



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

Instituto de Geografía

**Accidentes de tránsito en la República Mexicana: un modelo
estocástico para analizar los procesos de riesgo latentes**

T E S I S

Que para optar por el grado de

Doctor en Geografía

P R E S E N T A:

HARVEY SPENCER SÁNCHEZ RESTREPO

Director de Tesis: DR. LUÍS CHIAS BÉCERRIL

UNAM, Instituto de Geografía

Sinodales: DR. ENRIQUE PROPÍN FREJOMIL

UNAM, Instituto de Geografía

DRA. MARTHA CECILIA HÍJAR MEDINA

Instituto Nacional de Salud Pública

DR. PABLO PÉREZ AKAKI

UNAM, Facultad de Estudios Superiores 'Acatlán'

DR. BENITO SÁNCHEZ LARA

UNAM, Facultad de Ingeniería

DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

UNAM, Facultad de Ingeniería

México, Ciudad de México, 27 de noviembre de 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Algunas veces, uno logra terminar algo por completo, cerrar un ciclo más allá de la duda. Con este documento, se materializa un proceso que conllevó demasiado tiempo, paciencia y esfuerzo de algunas de las personas a las que más quiero.

Como este es un logro que proviene de mi educación, este paso es sin duda un logro de mis padres Rocío y Arturo, a quienes no puedo más que agradecer por su talento y paciencia para sembrar semillas: aunque la cosecha sea escasa, evidencias como esta son muestra de que su esfuerzo no ha sido estéril.

Por ser una fuente inagotable de admiración y aprendizaje, dedico a mi abuela Irma el buen cierre de esta aventura, quien me ha enseñado demasiadas cosas de las que solo menciono dos: 1) el método de mirar posible cualquier tarea, por inmensa que parezca y 2) el arte de aceptar las pasiones que corren en nuestra sangre.

A mi ñaña Belén, le dedico las horas de imaginación que puse en el interior de estas páginas para continuar caminando y no claudicar ante las desavenencias y decepciones.

Por último, dedico las críticas y conclusiones vertidas de este documento a todas las víctimas de los eventos de tránsito y a los seres que los extrañan, confío en que esta investigación ayude a disminuir el sufrimiento humano producido por este fenómeno.

Agradecimientos

Este trabajo es producto de un equipo de trabajo coordinado por el Dr. Luis Chias, quien desde hace décadas ha dedicado sus esfuerzos al estudio de los eventos de tránsito con una mirada profundamente interdisciplinaria, sean para él mis primeros y más profundos agradecimientos.

Para mi fortuna, el tiempo permitió que lograra comprender algunos de los intereses, objetivos y aristas de este objeto de investigación, también que lograra aceptar que es un tema de muy largo aliento que enfrenta desafíos que trascienden a los aspectos meramente teóricos y técnicos, por lo que también agradezco a Héctor Reséndiz, Armando Martínez y todos los demás integrantes de GITS que me han permitido aprender sobre este fenómeno tan apasionante.

También deseo expresar mi agradecimiento a la Dra. Martha Híjar, sin duda, un pilar fundamental para el desarrollo de la investigación científica en el país y que ha suscitado las preguntas esenciales en este trabajo.

Asimismo, reconozco ampliamente al Dr. Enrique Propín y Dr. Pablo Pérez Akaki por sus valiosos comentarios, aportes y paciencia a lo largo de esta travesía.

Desde luego, los valiosos comentarios del Dr. Ricardo Aceves y Dr. Benito Sánchez, sinodales en este proyecto de tesis y a todos los mencionados en las referencias, sus aportes son invaluable para el conocimiento humano.

Por último, quisiera expresar mi agradecimiento a mis padres, familiares, amigos, colegas y todas las personas que han ayudado a que pueda concluir con este proyecto: algunas veces, solo es necesario saber que algo tiene sentido para alguien para poder continuar, así que gracias por su generosidad.

Índice de contenidos

Introducción.....	12
Capítulo 1. Riesgo y complejidad en el espacio geográfico	27
1.1 Panorama global de los eventos de tránsito.....	29
1.2 La crisis del paradigma tradicional	39
1.3 Inseguridad y procesos latentes.....	46
1.4 La sociedad del riesgo.....	61
1.5 Azar, determinismo y complejidad	64
1.6 México: el espacio geográfico en estudio	69
Capítulo 2. Procesos de riesgo por eventos de tránsito	79
2.1 Variables aleatorias y procesos estocásticos	81
2.2 Discordancias y eventos de tránsito	95
2.3 Evolución temporal de los ET.....	128
2.4 Procesos de riesgo poblacional	141
Capítulo 3. Riesgo y dinámica poblacional.....	161
3.1 Privación de la vida.....	162
3.2 Intensidad del riesgo	188
3.3 Tiempos de latencia	205
3.4 Tiempo de vida perdido	221
Capítulo 4. Riesgos competitivos y tipos de efecto.....	231
4.1 Determinantes del riesgo.....	233
4.2 Riesgos competitivos	256
4.3 Tipos de efecto	294
4.4 Desafíos ante los ODS	314
Conclusiones	323
Discusión.....	324
Referencias	344
Anexo A.....	358
Anexo B	359

Índice de cartogramas

Mapa 1.1. Eventos celebrados en la <i>Cuarta Semana Mundial de Seguridad Vial</i>	32
Mapa 1.2. Legislación sobre límites de velocidad en ciudad, por países o zona	34
Mapa 1.3. Leyes sobre conducción bajo los efectos del alcohol, por países o zona.	34
Mapa 1.4. Leyes sobre el uso del casco y normas para homologarlos, por país o zona	35
Mapa 1.5. Leyes sobre el uso del cinturón de seguridad, por país o zona	35
Mapa 1.6. Leyes sobre el uso de sistemas de retención infantil por país o zona	36
Mapa 1.7. Superficie de la República Mexicana con sus divisiones municipales.	71
Mapa 1.8. Red carretera de la República Mexicana en 2018.....	74
Mapa 1.9. Localidades de la República Mexicana con áreas de influencia a 1, 3 y 10 km.	75
Mapa 1.10. Sistema Urbano Nacional de México en 2018.....	77
Mapas 2.1.a y 2.1b. Tamaño de población de los municipios en los años 1997 y 2018	94
Mapa 2.2. Variación de la población municipal entre 1997 y 2018	94
Mapas 2.3.a y 2.3b. Frecuencia absoluta de ATUS a nivel estatal en los años 1997 y 2018	101
Mapas 2.4.a y 2.4b. Frecuencia absoluta de ATUS a nivel municipal en los años 1997 y 2018.....	103
Mapa 2.5. Variación de ATUS municipal en el periodo 1997-2018	106
Mapas 2.6.a y 2.6b. Distribución de los <i>ET Fatales</i> . ATUS municipal, 1997 y 2018	114
Mapa 2.7. Variación de los <i>ET-Fatales</i> en el periodo 1997-2018, ATUS municipal.....	114
Mapas 2.8.a y 2.8b. Distribución de los <i>ET-No Fatales</i> . ATUS municipal, 1997 y 2018.....	116
Mapa 2.9. Variación de los <i>ET-No fatales</i> en el periodo 1997-2018, ATUS municipal.....	117
Mapas 2.10a y 2.10b. Distribución de los <i>ET-Solo daños</i> . ATUS municipal, 1997 y 2018.....	118
Mapa 2.11. Variación de los <i>ET-Solo daños</i> en el periodo 1997-2018, ATUS municipal	118
Mapas 2.12a y 2.12b. Niveles de <i>Incidencia de ET</i> en los municipios, 1997-2018	144
Mapa 2.13. Variación de la <i>Incidencia de ET</i> en el periodo 1997-2018, a nivel municipal	144
Mapas 2.14a y 14b. Defunciones por ET y ATUS en las entidades durante 2018.....	147
Mapas 2.15a y 15b. Letalidad en los municipios en los años 1997 y 2018.....	156
Mapa 2.16. Variación de la <i>Letalidad de los ET</i> en el periodo 1997-2018, a nivel municipal	157
Mapas 3.1a y 3.1b. Defunciones y heridos registrados por ATUS en 2018.....	180
Mapa 3.2. Correlación entre número de defunciones y heridos registrados por ATUS, 1997-2018	182
Mapa 3.3. Evolución del número de <i>heridos por cada defunción</i> a nivel estatal, 1998-2018	185
Mapa 3.4. Pronóstico del número de <i>heridos por cada defunción</i> a nivel estatal en 2020	187
Mapas 3.5. a y 3.5b. <i>Tasa de mortalidad por ET</i> en el periodo 1997-2018, a nivel municipal.....	194
Mapa 3.6. Variación de la <i>tasa de mortalidad municipal por ET</i> en el periodo 1997-2018.....	194
Mapas 3.7a y 3.7b. Letalidad municipal por <i>ET-Fatal</i> en los años 1997 y 2018.....	198
Mapa 3.8. Niveles de <i>riesgo latente</i> en los municipios en 2018.....	200
Mapa 3.9. Niveles de <i>riesgo latente</i> en el sistema de transporte de México, 1997-2018	201
Mapa 4.1. Variación de la <i>población municipal en el tiempo</i> , 1997-2018	252
Mapa 4.2. <i>Número de defunciones</i> en 2018 a nivel municipal.	255
Mapas 4.3a, 4.3b y 4.3c. <i>Número de defunciones de motociclistas</i> en México, 1998, 2008 y 2018.....	263
Mapa 4.4. Acumulación de las <i>defunciones de motociclistas</i> en el tiempo y el territorio.	264
Mapa 4.5. Correlación municipal entre <i>defunciones de peatones y motociclistas</i> , 1998-2018.....	280
Mapa 4.6. Variación de la población en el tiempo. Escala municipal, 1997-2018.....	308

Índice de figuras

Figura 1.1. Defunciones mundiales por ET con base en el nivel de ingreso de los países	33
Figura 1.2. Evolución de los paradigmas en el estudio de los eventos de tránsito	40
Figura 1.3. Proceso de conformación del riesgo y sus consecuencias observadas	49
Figura 1.4. Diversidad semántica y convergencia conceptual del riesgo	62
Figura 1.5. Distribución de la <i>Red Nacional de Caminos</i> , por tipo de carretera	73
Figura 2.1. Familia de funciones de distribución de la población por edad, 1990-2018	83
Figura 2.2. Evolución del tamaño de población, por sexo, 1990-2050	88
Figura 2.3. Distribución de la población entre las entidades federativas en 2018	89
Figura 2.4. Tasa anual, quinquenal y acumulada de crecimiento de la población, 1990-2020.....	90
Figura 2.5. Evolución de las tasas de variación anual acumulada e interanual, 1990-2020	91
Figura 2.6. Tasas de variación interanual con tendencia temporal e histograma, 1990-2020	91
Figura 2.7. Variación en la población por entidad federativa durante el periodo 1990-2018.....	92
Figura 2.8. Variación en la población por entidad federativa, 1997-2018	93
Figura 2.9. Evolución de la frecuencia absoluta y tendencias de ATUS bajo MCO, 1997-2018.....	100
Figura 2.10. Porcentaje acumulado de ATUS por entidad federativa, 1997-2018	101
Figura 2.11. Distribución de ATUS en las entidades federativas, 1997-2018.....	102
Figuras 2.12a y 2.12b. Histograma del número de municipios por ATUS acumulado 1997-2018.....	103
Figura 2.13. Frecuencia relativa acumulada de ATUS por número de municipios, 1997-2018.....	104
Figura 2.14. Frecuencia relativa de ATUS, por número de municipios en 1997 y 2018.....	104
Figura 2.15. Evolución del número de municipios con registros de ATUS en cada año, 1997-2018	107
Figura 2.16. Evolución de las registros de ATUS nacional, 1997-2018.....	108
Figura 2.17. Evolución de las variaciones interanuales y respecto año base. ATUS 1997-2018	108
Figura 2.18. Evolución de la frecuencia absoluta de cada clase de ATUS, 1997-2018.....	111
Figura 2.19. Frecuencia acumulada de cada clase de ATUS, 1997-2018.....	111
Figura 2.20. Evolución de la frecuencia relativa de cada clase de ATUS, 1997-2018.....	112
Figura 2.21. Distribución y evolución de los <i>ET-Fatales</i> . ATUS estatal, 1997-2018	113
Figura 2.22. Distribución y evolución de los <i>ET- No fatales</i> . ATUS estatal, 1997-2018.....	115
Figura 2.23. Distribución y evolución de los <i>ET-Solo daños</i> . ATUS estatal, 1997-2018	117
Figura 2.24. Extracto de serie de tiempo ATUS-2018 con número de fatalidades.....	119
Figura 2.25. Extracto de serie de tiempo ATUS-2018, con fecha y hora aproximada	120
Figura 2.26. Evolución de la frecuencia absoluta y tendencias de ATUS, 1997.01-2018.12.....	123
Figura 2.27. Histogramas de número y tiempos entre ocurrencias de ATUS, 1997.01-2018.12.....	123
Figura 2.28. Histogramas de número de ocurrencias ATUS y Complemento de ET, 1997.01-2018.12	125
Figura 2.29. Histogramas de frecuencias de ocurrencias de ET por clase, 1997.01-2018.12.....	126
Figura 2.30. Histogramas de tiempos entre ocurrencias de ET por clase, 1997.01-2018.12	127
Figura 2.31. Evolución del tiempo promedio entre ocurrencias, 1997-2018.....	128
Figura 2.32. Evolución de la variación anual de ATUS, 1997-2018.....	129
Figura 2.33. Evolución de la variación en la proporción de cada clase de ATUS. Nacional, 1997-2018.....	130
Figura 2.34. Evolución de las variaciones en la frecuencia de ATUS. Nacional, 1997-2018	131
Figura 2.35. Evolución de las variaciones interanuales de ATUS y <i>ATUS-Fatales</i> , 1997-2018.....	132
Figura 2.36. Evolución de las variaciones de ATUS y <i>ATUS-Fatales</i> , 1997-2018.....	132
Figura 2.37. Evolución de las variaciones interanuales de ATUS y <i>ATUS-No fatales</i> , 1997-2018	133
Figura 2.38. Evolución de las variaciones de ATUS y <i>ATUS-No fatales</i> , 1997-2018.....	133
Figura 2.40. Evolución de las variaciones de ATUS y <i>ATUS-Solo daños</i> , 1997-2018	134
Figura 2.41. Evolución de la variación estandarizada de la frecuencia de ET. Nacional 1997-2018.....	138
Figura 2.42. Pronóstico de la serie nacional <i>de ATUS</i> para 2017.1-2021.12.....	140
Figura 2.44. Procesos de <i>frecuencia e incidencia</i> . Nacional 1997-2018	142
Figura 2.45. Distribución y evolución de la <i>Incidencia</i> . ATUS estatal, 1997-2018	142

Figura 2.46. Relación entre la incidencia total y la incidencia por clases de ATUS 1997-2018.....	143
Figura 2.47. Histograma de las variaciones municipales, 1997-2018	145
Figura 2.48. Distribución y evolución del <i>número de defunciones</i> totales; estatal, 1997-2018.....	146
Figura 2.49. Evolución del número de defunciones totales por ET y ATUS, 1997-2018	147
Figura 2.50. Distribución y evolución del <i>número de defunciones</i> por ET; estatal, 1997-2018.....	148
Figura 2.51. Distribución y evolución del <i>número de defunciones</i> por ATUS; estatal, 1997-2018	149
Figura 2.52. Correlación entre las defunciones por ET y por ATUS. Estatal 1997-2018	150
Figura 2.53. Evolución de la <i>OR de ET</i> y <i>ATUS</i> respecto defunciones totales, 1998-2018.....	151
Figura 2.54. Evolución de la <i>OR de ET</i> y <i>ATUS</i> respecto defunciones totales, 1998.1-2018.12.....	152
Figura 2.55. Evolución de la <i>OR</i> de defunciones ATUS respecto a ET. Nacional 1998.1-2018.12	153
Figura 2.56. Relación entre los ET y <i>ET-Fatales</i> con las defunciones por ET, 1998-2018	154
Figura 2.57. Evolución de las defunciones por ET y de los <i>ET-Fatales</i> , 1997-2018	154
Figura 2.58. Evolución del proceso de Letalidad por ET. ATUS 1997-2018.....	155
Figura 2.59. Rango de variación estatal de la Letalidad de los ET en el periodo 1997-2018.....	158
Figura 3.1. Evolución de los menores de 1 año durante el periodo 1990-2018.....	164
Figura 3.2. Evolución de la edad ω durante el periodo 1990-2018	164
Figura 3.3. Evolución del número de defunciones en México por grupo de edad, 1998-2018	165
Figura 3.4. Evolución del número acumulado de defunciones por grupo de edad, 1998-2018.....	166
Figura 3.5. Evolución del número total de defunciones y de los menores de 1 año vivos, 1990-2018 ...	167
Figura 3.6. Evolución del número de menores de 1 año vivos y de sus defunciones, 1990-2018.....	167
Figura 3.7. Distribución de las defunciones por ET en función de los grupos de edad, 1998-2018.....	168
Figura 3.8. Número acumulado de defunciones por ET por grupos de edad, 1998-2018	169
Figura 3.9. Distribución de las probabilidades de defunción por ET por grupo de edad, 1998-2018	170
Figura 3.10. Distribución de las probabilidades de defunción por ET, entre 0 y 14 años, 1998-2018	171
Figura 3.11. Variación interanual de las defunciones por ET por grupo de Edad, 1998-2018.....	172
Figura 3.12. Evolución de la acumulación de las defunciones por cohorte, 1990-2018.....	173
Figura 3.13. Evolución de la acumulación de defunciones en las cohortes 1990-2018.....	174
Figura 3.14. Funciones de distribución para las cohortes 1990-2018.....	175
Figura 3.15. Funciones de supervivencia para las cohortes 1990-2018	176
Figura 3.16. Funciones de distribución y supervivencia poblacional para las cohortes 1990-2018	177
Figura 3.17. Número de sobrevivientes adicionales por edad al contrastar tasa de 2018 versus 1990....	178
Figura 3.18. Evolución del número de <i>Heridos</i> y <i>Defunciones</i> , 1998-2018.....	179
Figura 3.19. Evolución del cociente y la correlación entre <i>Defunciones</i> y <i>Heridos</i> , 1998-2018.....	181
Figura 3.20. Evolución del <i>número de heridos por cada defunción</i> , 1998-2018	183
Figura 3.21. Evolución del número de <i>heridos por cada defunción</i> a nivel estatal, 1998-2018.....	184
Figura 3.22. Evolución del <i>número de heridos por cada defunción</i> , 1998-2018	186
Figura 3.23. Histograma del <i>número de heridos por cada defunción</i> , nivel estatal, 1998-2018	186
Figura 3.24. Histograma del <i>número de defunciones por millón de habitantes</i> . Estatal 1998-2018	188
Figura 3.25. Serie de tiempo con el número de ET y el número de fallecimientos producidos	189
Figura 3.26. Masas de probabilidad de las defunciones por edad, series 1998-2018	191
Figura 3.27. Funciones de distribución y supervivencia a los ET, cohortes 1998-2018.....	192
Figura 3.28. Evolución de la <i>tasa de mortalidad de los ET</i> en el periodo 1997-2018.....	193
Figura 3.29. Rango de la <i>severidad del riesgo</i> a nivel estatal en el periodo 1997-2018.....	197
Figura 3.30. Correlación entre la letalidad por ET y por <i>ET-Fatal</i> a nivel estatal, 1997-2018	199
Figura 3.31. Defunciones por todas las clases de ET, desagregado por edad, 1997-2018	202
Figura 3.32. Defunciones por ET, desagregado por edad. Nacional, 1997-2018.....	203
Figura 3.33. Probabilidades marginales de defunción por ET, 1997-2018	204
Figura 3.34. Intensidad del riesgo por ET, series 1998-2018	206
Figura 3.35. Correlación entre intensidad del riesgo y tasa de mortalidad por grupo etario, 1998-2018	207
Figura 3.36. Pendiente de la tendencia de las variaciones por grupo de edad, 1998-2018.....	208

Figura 3.37. Ajuste paramétrico de la frecuencia relativa de las defunciones por edad, 1998-2018.....	210
Figura 3.38. Ajuste paramétrico de la frecuencia de las defunciones por grupo etario, 1998-2018.....	211
Figura 3.39. Evolución de los parámetros de estimación para la distribución de Weibull, 1998-2018...	211
Figura 3.40. Variación en la expectativa de vida a través de los años, 1998-2018	219
Figura 3.41. Variación en la expectativa de vida a través de los años, 1998-2018	220
Figura 3.42. Esperanza de vida condicional al grupo de edad, 1998 vs 2018	221
Figura 3.43. Fuerza de mortalidad de los ET por grupo etario, 1998-2018.....	223
Figura 4.1. Número de <i>defunciones por tipo de usuario de la vía, 1998-2018</i>	236
Figura 4.2. Evolución de las defunciones de <i>personas fuerte y levemente vulnerables</i> , 1998-2018	239
Figura 4.3. Oportunidad relativa entre <i>personas fuerte y levemente vulnerables</i> , 1998-2018.....	240
Figura 4.4. Evolución de los <i>porcentajes de defunciones de peatones y no-peatones</i> , 1999-2018	241
Figura 4.5. Evolución del <i>número de defunciones de peatones</i> por grupo etario, 1998-2018.....	242
Figura 4.6. Evolución de las <i>tasas de mortalidad de peatones</i> por grupo etario, 1998-2018.....	242
Figura 4.7. Contraste de las <i>fuerzas anuales de mortalidad en peatones</i> , 1998-2018.....	243
Figura 4.8. Variación en las <i>defunciones totales y las tasas de mortalidad</i> entre 1998 y 2018	244
Figura 4.9. <i>Parámetros de la regresión logística</i> por grupo etario, 1998-2018	248
Figura 4.10. <i>Parámetros logit de la regresión del modelo</i> por grupo etario, 1998-2018	249
Figura 4.11. Relación entre <i>tasas de mortalidad y probabilidad de defunción</i> por edad, 1998-2018	252
Figura 4.12. Evolución y proyección del <i>número de defunciones de peatones</i> , 1998-2018.....	253
Figura 4.13. Relación entre <i>tamaño de población y defunciones de peatones</i> , municipal 1998-2018	254
Figura 4.14. Evolución y proyección de la <i>tasas de mortalidad de peatones</i> por grupo etario	255
Figura 4.15. Evolución de las <i>tasas de mortalidad por tipo de usuario</i> , 1998-2018.....	261
Figura 4.16. Evolución del número de <i>defunciones por tipo de usuario</i> , 1998-2018.....	262
Figura 4.17. Evolución del número de <i>municipios con defunciones de motociclistas</i> , 1998-2018	264
Figura 4.18. Frecuencia absoluta de las <i>defunciones de motociclistas</i> por grupo etario, 1998-2018	266
Figura 4.19. Frecuencia acumulada de las <i>defunciones de motociclistas</i> por grupo etario, 1998-2018 ..	267
Figura 4.20. Frecuencia relativa de las <i>defunciones de motociclistas</i> por grupo etario, 1998-2018.....	268
Figura 4.21. Evolución de las <i>defunciones de motociclistas</i> entre 15 y 44 años, 1998-2018	269
Figura 4.22. Evolución de las <i>defunciones de motociclistas</i> por sexo, 1998-2018.....	269
Figura 4.23. Evolución de la <i>OR entre fuerte y levemente vulnerables</i> , 1998-2018	272
Figura 4.24. Evolución de las defunciones de <i>leve y fuertemente vulnerables</i> , por sexo, 1998-2018.....	273
Figura 4.25. Evolución de las <i>tasas de mortalidad</i> de motociclistas por grupo etario, 1998-2018.....	276
Figura 4.26. <i>Fuerza de mortalidad en los motociclistas</i> por grupo de edad, 1998-2018.....	277
Figura 4.27. Relación entre <i>el número de defunciones de peatones y de motociclistas</i> , 1998-2018	278
Figura 4.28. Correlación municipal entre <i>defunciones de peatones y de motociclistas</i> , 1998-2018.....	279
Figura 4.29. Peso de la <i>tasa central de riesgo de los peatones</i> respecto al grupo etario, 1998-2018.....	289
Figura 4.31. Relación entre la <i>pendiente de regresión y la variación en los pesos</i> entre 1998 y 2018 ...	292
Figura 4.32. Evolución de la <i>tasa de mortalidad de los motociclistas</i> por grupo etario, 1998-2018	294
Figura 4.33. Número de defunciones por <i>todas las causas de ET por sexo</i> , 1997-2018	297
Figura 4.35. Probabilidades condicionales de defunción por ET y por sexo, 1998-2018.....	299
Figura 4.36. Ratio de las <i>probabilidades de defunción por sexo</i> , 1998-2018.....	300
Figura 4.37. Evolución del <i>número de defunciones por ET y ATUS</i> , 1998-2018.....	301
Figura 4.38. <i>P-value</i> de la probabilidad del del registro, dada la serie de tiempo, 1998-2018.....	302
Figura 4.39. <i>P-value</i> de la probabilidad de observar el Ratio, dada la serie de tiempo, 1998-2018.....	302
Figura 4.40. <i>P-value</i> de la probabilidad de observar la estimación, dada la serie 1998-2018.....	303
Figura 4.43. Variaciones del número de defunciones por ATUS con ajuste en el periodo 2007-2011 ...	307
Figura 4.45. Probabilidad condicional de defunción por ET, dada la edad de ocurrencia, 1997-2018 ...	310
Figura 4.46. Variación de las defunciones totales y por ET respecto año base, 1998- 2018.....	311
Figura 4.46. Variación en el riesgo de defunción por ET por grupo etario, 1998- 2018.....	311
Figura 4.50. Proyección de defunciones por ET para 2010-2020 con base en experiencia 1999-2010...	316

Figura 4.51. Número de defunciones evitadas, experiencia 1999-2010 y proyecciones 2011-2020.....	317
Figura 4.52. Número de defunciones evitadas con tasa de mortalidad ET-2010, por grupo etario	319
Figura 4.53. Número acumulado de defunciones evitadas con tasa de mortalidad ET-2010	319
Figura 4.55. Porcentaje de defunciones evitadas por grupo etario, proyecciones 2011-2020	320
Figura 4.56. Número de defunciones evitadas con base en distintas proyecciones para 2011-2020.....	321

Resumen

En esta investigación se desarrolla un conjunto de modelos basados en ecuaciones provenientes de la teoría del riesgo y el cálculo actuarial para modelar los riesgos latentes asociados con la ocurrencia de eventos de tránsito (ET) con el fin de analizar sus procesos de distribución espacial y temporal y conocer su magnitud y relación con la dinámica demográfica. El objetivo central es establecer procedimientos científicos para la estimación eficiente, válida, confiable y estable de los diversos índices relacionados con este fenómeno, tales como la frecuencia, incidencia, letalidad y mortalidad en grupos poblacionales, así como crear nuevas métricas y realizar proyecciones y simulaciones en diversas escalas territoriales y temporales mediante modelos no deterministas.

Este nuevo enfoque permite una interpretación más amplia de los resultados para valorar su impacto en los sistemas social, económico y de salud mediante un abordaje de riesgo dinámico, lo que estimula una aproximación más cercana a la epidemiología social, así como estudios más solventes para comprender por qué algunos ET afectan a las personas en forma diferenciada a partir del estudio de sus niveles de exposición y vulnerabilidad, apuntando al descubrimiento de variables localizadas territorialmente que ayudan a explicar la frecuencia, severidad y variabilidad del fenómeno.

A lo largo del texto, se emplean resultados de la teoría estadística, de los procesos estocásticos y el cálculo actuarial como herramientas instrumentales y de pensamiento para facilitar la estimación y análisis de la evolución espacial y temporal de los indicadores para cada clase de evento, lo que ofrece dos bondades: 1) permitir la interpretación de los resultados dentro de un marco analítico más robusto e intuitivo, y 2) identificar y separar los efectos de las variaciones entre la edad, las cohortes y los periodos con distintas condiciones geográficas, socioeconómicas y demográficas, ayudando a resolver uno de los mayores pendientes en los estudios longitudinales del tránsito y a evitar errores metodológicos y confusiones en la interpretación de los resultados a la hora de diseñar políticas basadas en evidencia.

Entre los objetivos del proyecto también se incluye la estimación de las distribuciones empíricas de las variables asociadas a la frecuencia y severidad, así como la caracterización de la vulnerabilidad de distintos grupos de población mediante una analogía ecológica que propone que los diversos riesgos latentes compiten por ocurrir diferencialmente en ciertos grupos —mediante una función de intensidad específica— lo que provee de las ecuaciones necesarias para construir matrices de transición de riesgo, variaciones y tendencias en la letalidad, morbilidad, y mortalidad; mejorando las técnicas de estimación del tiempo potencial de vida perdida y brindando herramientas novedosas para reconocer y analizar los efectos Edad, Cohorte y Periodo en distintos grupos de población.

Palabras clave: Eventos de tránsito, Riesgo, Mortalidad, Letalidad, Severidad, México.

Introducción

‘Todas las ideas, incluso las sagradas, deben adaptarse a las nuevas realidades. La idea de lo sagrado es simplemente una de las ideas más conservadoras en cualquier cultura, ya que busca convertir las otras ideas —la incertidumbre, el progreso, el cambio—, en crímenes’

Salman Rushdie. *Shalimar el payaso* (2005)

‘Hay más problemólogos que solucionólogos.’

Joaquín Salvador Lavado Quino. *Mafalda* (1979)

Planteamiento del problema

El panorama global

Como resultado de las actividades de investigación y de los estudios más recientes llevados a cabo en varios países, se sabe que las lesiones causadas por los eventos de tránsito (ET) permanecen como uno de los más importantes problemas de salud pública y que cada vez cobra más víctimas. En el año 2000, los ET fueron la décima causa de mortalidad mundial con 1.17 millones y en 2018 se situó en la octava posición: de los 56,4 millones de defunciones registradas en el mundo, más de 1.4 fueron por ET, es decir, una persona murió en un ET cada 25 segundos y que entre 20 y 50 millones de personas sufrieron lesiones graves (WHO, 2018). Además, las personas de entre 15 y 44 años representaron en 2018 el 48% de las muertes totales y los hombres exhibieron una mayor propensión que las mujeres a fallecer en un ET, además, 74% de todas las defunciones por esta causa ocurren en hombres menores de 25 años (WHO, 2018).

Hace apenas poco más de una década, la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), impulsó una agenda global para producir el primer *Global status report on road safety* (Toroyan, 2009) en donde se señala que los ET ocupan el primer lugar como causa de muerte entre las lesiones por causa externa y son el noveno contribuyente a las enfermedades, lo que ya entonces representaba una enorme carga para los sistemas de salud, particularmente en los países con ingreso medio y bajo (WHO, 2009; WHO, 2015). Además, cerca de la mitad de los que fallecen en las carreteras por ET son ‘usuarios vulnerables’: peatones, ciclistas y motociclista (Hidalgo-Solorzano; Rodrigues J. et al., 2014; Muro-Báez VA, 2017), por lo que el fenómeno continúa acumulando millones de víctimas mortales y personas con discapacidad permanente (WHO, 2013; WHO, 2015; WHO, 2018).

Para hacer más visible el complejo panorama que los ET plantean, en marzo de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó al periodo 2011-2020 como el *Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020* (DASV) con el objetivo general de “estabilizar y, posteriormente, reducir las cifras previstas de víctimas mortales en accidentes de tránsito en todo el mundo” (ONU, 2010). Posteriormente, los ET se integraron a la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), propiciando el diseño y la puesta en marcha de diversas políticas públicas para reducir este grave problema de salud pública sobre el que es necesario producir estimaciones válidas y confiables que permitan estimar las variaciones en el tiempo y el territorio, así como garantizar una rendición de cuentas clara, transparente y oportuna en todos los países y en los diferentes niveles de gobierno.

Los desafíos de México ante los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Desde luego, en México la siniestralidad vial también forma parte de las pandemias del presente y es una de las causas de muerte evitable más significativas. Según las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), entre las causas de mortalidad general, los ET ocupan el primer lugar en niños mayores de un año y adolescentes y adultos en edad productiva y son también la primera causa externa de fallecimiento. A pesar de las diversas iniciativas, la edad promedio de muerte por esta causa es 37 años y ya se configura como la segunda causa de orfandad. Los lesionados por ET demandaron más de tres millones de consultas y más de dos millones y medio de días-cama en las instalaciones hospitalarias del sector salud, además se estima que en hospitales particulares se tuvo una afluencia similar, lo cual podría dar como resultado 18 000 discapacitados permanentes anualmente y una repercusión económica por más de 63 mil millones de pesos cada año (Ventura-Alfaro et al, 2015).

El problema es de tal magnitud, que cada año se registran más de 16 000 casos de mexicanos que mueren a causa de un ET, es decir, dos personas por hora (Sánchez-Restrepo H. C., 2019). Además, la incesante adquisición de vehículos automotores magnifica la problemática y las amenazas asociadas: mientras que en un periodo de diez años el parque vehicular se incrementó en cerca de 500 mil unidades por año en promedio, a partir del año dos mil se ha duplicado a 1 millón de automóviles por año, siendo la zona centro y la Ciudad de México las de mayor concentración, con más de 5 millones de unidades y donde el 87% de ellos es de uso privado y concentra más del 25% del total registrados en el país (Zamarrón, 2018).

A pesar de las evidencias, la escasez de recursos y el complejo escenario nacional, las secretarías de Salud y de Comunicaciones y Transportes aceptaron las metas propuestas por la Asamblea de las Naciones Unidas sin ninguna discusión o análisis técnico (Híjar et al, 2018), a partir de la cual emitieron la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, con la afirmación de que se encontraba ‘alineada a los 5 Pilares de Acción del Plan Mundial por la seguridad vial de Naciones Unidas’ y lograron la adhesión de la Conferencia Nacional de Gobernadores (CONAGO) (SCT; SSA, 2011).

De acuerdo con algunos autores (Cervantes-Trejo, 2016; Híjar et al, 2018; Sánchez-Restrepo H. C., 2019), México ha avanzado hacia la meta global mediante la prevención potencial de más de diez mil muertes entre 2011 y 2015, lo que ‘se refleja principalmente en una disminución en el número de muertes de ocupantes de vehículos de motor’ (Híjar et al, 2018). No obstante, no es posible comparar la magnitud del fenómeno en más ámbitos debido a múltiples razones, entre las que destacan:

1. Diversidad de protocolos de registro de los ET por parte de las autoridades entre los diferentes niveles de gobierno.
2. Ausencia de errores de medición en los métodos de estimación de las métricas nacionales que midan las variables en forma íntegra a lo largo del tiempo y el territorio.
3. Falta de periodicidad en la disponibilidad de indicadores sintéticos que brinden información integral sobre los fenómenos viales y su impacto en los diversos aspectos de la salud, la economía, la productividad y otras relacionadas con los ET.

Lo anterior señala que aún falta mucho por avanzar y existen múltiples motivos por el que las acciones podrían tener un alto costo de oportunidad. En primer lugar, la ausencia de un programa intersectorial que permita coordinar los esfuerzos para medir el impacto de las distintas iniciativas y realizar diagnósticos integrales sigue siendo un tema pendiente (Híjar, 2004). En este sentido, como menciona Luis Chías ‘Si se parte de premisas equivocadas o poco sustentadas, se generan falsas creencias y patrones de conducta inadecuados, [los cuales] incrementan de manera implícita, los riesgos sociales y naturales que se conjugan en la ocurrencia de los AT’. Lo cierto es que los ET continúan en aumento al igual que sus indeseables consecuencias, por lo que el destino de los recursos humanos, materiales e incluso intelectuales, así como el conjunto de esfuerzos de investigación sigue siendo la atención y el ‘retorno a la normalidad’ de las víctimas y no su prevención (Chías et al, 2009).

La racionalidad limitada

Las tensiones entre la aceptación de que los seres humanos poseen la capacidad de realizar elecciones racionales y que, al mismo tiempo, estas no son predominantes en la conducta humana, se centran en las evidencias sobre cómo las personas toman decisiones entre todas aquellas alternativas que consideran plausibles (Koechlin, E., 2020), incluyendo, por supuesto, las que involucran conductas de riesgo que pueden concluir en tragedias y con la propia vida. A pesar de que, en los últimos años, los avances en el saber científico para plantear situaciones con control experimental en materia de tránsito han sido enormes, los desacuerdos más frecuentes no suelen desarrollarse sobre situaciones empíricas, sino sobre el marco teórico de referencia (Rothe, J. P., 2020), algo que aún tendrá muchos debates y ajustes de dirección en un futuro no muy lejano.

Por su naturaleza, existe una amplia variedad de conjeturas sobre cómo funciona la mente humana, resulta más acotado el abanico de modelos que pretenden explicar cómo y por qué los humanos actúan en la manera que lo hacen, en lo que ya comienzan a predominar los procedimientos experimentales. Aunque todavía ninguna de ellas predice en forma precisa y continua el comportamiento en la escala individual y, a pesar de que los modelos para las conductas sociales enfrentan aún demasiados desafíos, tanto en sus definiciones como en los cimientos de sus objetos de estudio, la humanidad

cuenta ya con diversas herramientas de naturaleza científica que permiten modelar y anticipar las respuestas colectivas ante múltiples estímulos, lo que también permite reconocer la emergencia de patrones y dinámicas espaciales y temporales a partir del estudio agregado de las conductas individuales.

Ahora bien, sin pretender minimizar el necesario conocimiento y comprensión del comportamiento humano, se puede afirmar que, para realizar ciertas estimaciones o explicar algunos fenómenos sociales, culturales, incluso psicológicos, no se precisa que estas discusiones estén resueltas —ni siquiera que se resuelvan algún día—, menos aún si el fin de las estimaciones y las explicaciones reside en emprender diversas acciones de política que mejoren la calidad de vida de las personas desde una perspectiva colectiva.

Por ejemplo, independientemente del proceso de decisión de cada individuo, el hecho de que las personas reaccionan a los cambios en los incentivos es algo que podría reconocerse como una especie de ‘ley universal del comportamiento’, sobre lo cual se cuenta con múltiples evidencias (Koechlin, E., 2020), planteamiento sobre el cual es posible llevar a cabo experimentos y recolectar datos con múltiples propósitos —principalmente estimar la magnitud de un cambio de conducta como respuesta a una variación en el conjunto de incentivos—, o incluso hallar potenciales respuestas a escenarios probables, o anticipar las decisiones futuras de agentes con distintos niveles de impacto político, social, cultural, económico o financiero (De Martino, et al, 2006; Cushman, F., 2020).

En este sentido, es imprescindible reconocer que, a lo largo de este siglo, las ciencias sociales han robustecido profundamente sus cuerpos teóricos y que también se han vuelto mucho más empíricas en su quehacer cotidiano, para lo que parecen existir dos razones principales.

Primero, que los avances sustanciales en la teoría estadística y su expansión generalizada han fomentado que ya no solo sea considerada como una herramienta instrumental para el procesamiento y síntesis de datos, sino que en sí misma se constituya en una herramienta de pensamiento, incluso con alcances filosóficos y axiomáticos. Segundo, que el incesante aumento en la capacidad de cómputo en todos los sentidos y ámbitos del saber ha permitido diseñar e implementar modelos más complejos y robustos para recolectar, procesar y evaluar experimentos y fenómenos, promoviendo las estimaciones de los efectos de la política pública y de sus variaciones y adaptaciones, tanto a nivel micro como a escala meso y macro¹.

¹ Los recientes premios Nobel James Heckman y Daniel MacFadden han sido destacados en estos desarrollos.

Además, entre las diversas disciplinas científicas, la Geografía es probablemente la que más se ha visto favorecida a partir de estos dos pilares de desarrollo, como se puede observar a través de todos los dispositivos móviles, aplicaciones digitales y sistemas de geolocalización, sus enormes avances en las últimas décadas, tanto en sus métodos y conceptos, como en sus aplicaciones, se deben a la capacidad de producir conocimiento válido y confiable sobre diversos fenómenos, así como su probada eficiencia y efectividad para resolver problemas prácticos cotidianos.

Asimismo, Karlsson (2008) y diversos autores (Jung, S. S., & Jang, S. S., 2019; Henning, M., 2019) informan desde hace ya varios años que la aglomeración económica y el aumento de la densidad urbana continúan en aumento, lo que acompaña al auge acelerado de técnicas geográficas para el análisis y modelación de las relaciones humanas y su evolución en el espacio y el tiempo, provocando que los estériles anuncios de los pensadores del ‘fin de la Geografía’ (O’Brien 1992; Cairncross 1997) y los ciber-utopistas (Negroponte 1995), representen apenas una anécdota en la historia de la Geografía, ya que los efectos espaciales asociados a la masificación del comercio digital y la globalización, han ido en el sentido contrario a sus previsiones.

Ahora bien, aunque la ciencia geográfica está más viva que nunca, aún se encuentra lejos de ofrecer una descripción completa de cómo funciona el espacio geográfico —entendido como el espacio organizado por una sociedad—, aunque sí describe cada vez más y mejor algunos de los fenómenos producidos por el ser humano en la Tierra y a las interrelaciones que se dan entre los procesos de gestión a nivel espacial, lo que constituye una familia de pasos fundamentales para los saberes geográficos.

En años recientes, desde diversos ámbitos se plantea que el estudio de los ‘accidentes de tránsito’ se encuentra en crisis: no produce prácticamente nada nuevo, ni coadyuva a evitar su enorme impacto en el ser humano. Al parecer, el paradigma tradicional de su análisis basado en la descripción del fenómeno como algo inevitable es, en gran medida, el responsable, lo que incluso se ve reflejado en el nombre de su objeto de estudio, el cual, a pesar de que diversas voces en los más altos niveles han insistido en eliminar el vocablo ‘accidente’ (BMJ, 1996), la inercia discursiva y la laxitud con que la mayoría de las autoridades manejan el tema han evitado que el fenómeno y su abordaje se transformen, incluso en esta minucia².

En este sentido, dado que el estudio de los ‘accidentes de tránsito’ no es exclusivo de la geografía, sino un problema interdisciplinario en donde convergen fenómenos económicos y de salud que afectan las dinámicas sociales y poblacionales, así como diversos aspectos de la ingeniería y de las habilidades

² Desde 1996, el *British Medical Journal* publicó un artículo en el que desalentó el uso de la palabra ‘accidente’ cuando se refiere a lesiones o los eventos que las producen si estos eran evitables.

físicas, sociales y emocionales de los humanos, para dar pasos más firmes y desarrollar su estudio formal, es necesario reformular su concepción, los paradigmas y las herramientas empleadas para su estudio.

Con el fin de aportar al establecimiento de un nuevo andamiaje conceptual e instrumental, en esta investigación se sustituye a los ‘accidentes de tránsito’ por ‘eventos de tránsito’ (ET)³, entendido como la ocurrencia de sucesos motivados por discordancias multifactoriales en el espacio geográfico, las cuales provienen de las interrelaciones producidas entre los usuarios y las vías, motivadas por su necesidad de tránsito en un espacio finito; asumiendo que su ocurrencia no es fortuita sino el producto de distintos procesos dinámicos que, si bien pueden poseer elementos aleatorios, su componente esencial no lo es, por lo que es un fenómeno discernible y prevenible que demanda mejores herramientas de medición, estimación y proyección.

Ante este enfoque, el estudio de los eventos de tránsito demanda la incorporación de nuevos conceptos provenientes de los Procesos estocásticos, la Geografía del no-equilibrio, la Teoría del riesgo y las Ciencias de la complejidad, todo con el fin de abordar de manera más profunda y amplia los conceptos de azar y determinismo durante el proceso de estimar, predecir y explicar la evolución espacio-temporal de los distintos procesos de riesgo poblacional, sobre todo al reconocer que estos son producidos por la latencia de fenómenos asociados con el tránsito y la movilidad de las personas en un contexto social, el cual puede ser modificado mediante la articulación de instrumentos de investigación científica y política pública.

Para enfrentar la crisis del paradigma actual de estudio de los ET y coadyuvar a establecer uno nuevo, más acorde con los parámetros de investigación cualitativa basada en evidencias, se presenta este documento producto de una investigación que ha sido llevada a cabo a partir de los datos oficiales más recientes con que cuenta México, reuniendo en sus páginas un conjunto de resultados sistemáticos que ofrecen nuevas evidencias y conclusiones para el análisis del conjunto de datos que han producido las instituciones mexicanas en materia de demografía, transporte y salud.

Para articular el cuerpo teórico de esta propuesta con los resultados derivados de las investigaciones más recientes, en algunos casos, se retoman, sintetizan y articulan los métodos que ya han publicados en revistas de investigación arbitradas. De este modo, se prueba que los fundamentos y las ecuaciones desarrolladas en el proyecto son útiles en el quehacer cotidiano de la investigación científica y, al mismo tiempo, se aprovecha la oportunidad para actualizar los análisis y resultados, ya que aún no existen publicaciones como las aquí presentadas con los datos consolidados al año 2018.

³ Excepto en el título de este trabajo, el cual ha utilizado el nombre clásico hasta que esta propuesta y sus conceptos logren instalarse normativamente.

Este documento también aspira a servir como referencia para realizar diversos análisis, por lo que su presentación está preparada en secciones que pueden leerse de manera independiente con ecuaciones y argumentos que explican qué y cómo se realizan los análisis mediante recursos pedagógicos que, aunque exigen al lector cierta cultura y habilidades matemáticas, le acompañan intuitivamente en la interpretación de los resultados, especialmente en su representación gráfica.

Asimismo, el contenido está organizado como un relato secuencial que realiza paradas periódicas sobre distintos componentes de la realización del fenómeno global y en México, abordando distintas escalas de administración territorial: desde el ámbito nacional, estatal y municipal y su infraestructura carretera, hasta la desagregación de los ET y sus consecuencias en distintos grupos poblacionales, enfatizando el rol de la edad y sus efectos en la estructura de la composición demográfica.

A partir de estas consideraciones, la secuencia de los análisis se presenta mediante un orden deductivo: comienza de lo general a lo particular con secciones que atienden la desagregación como una consecuencia de los modelos propuestos para llevarlos a mayor profundidad, al mismo tiempo que ofrece los detalles instrumentales necesarios para comprender y reproducir las ecuaciones específicas de cada caso. De este modo, el relato ocurre a lo largo de cuatro capítulos que describe, analiza y evalúa los datos que subyacen a dos décadas de inseguridad vial en México—desde 1998 hasta 2018, como un conjunto informativo que permite dar cuenta el estado actual de la inseguridad en el transporte mediante un panorama que, sin ser exhaustivo ni pretender serlo, ofrece conocimiento inédito sobre los principales desafíos que afronta México al concluir el *Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020* (DASV).

Hipótesis

Emplear el enfoque estocástico para modelar los eventos de tránsito ayudará a establecer mejores técnicas de estimación para los indicadores actuales y aportará nuevas herramientas conceptuales e instrumentales para monitorear el avance en la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible.

Objetivos de investigación

Objetivo general

Establecer procedimientos científicos para la estimación eficiente, válida, confiable y estable de los diversos índices relacionados con los eventos de tránsito, tales como la frecuencia, incidencia, letalidad y mortalidad con sus diversas variantes, mediante modelos matemáticos no deterministas que

permitan realizar estimaciones y predicciones con mayor nivel de exactitud y precisión⁴ en diversas horizontes temporales y escalas territoriales.

Objetivos particulares

1. Formular un modelo estocástico mediante un conjunto de ecuaciones destinadas a la medición de los procesos de riesgo.
2. Desarrollar explícitamente los métodos de estimación de todas las ecuaciones empleadas.
3. Articular los conceptos y definiciones de la teoría del riesgo en la medición de los procesos de ocurrencia, frecuencia y severidad de distintas clases y tipos de eventos de tránsito.
4. Especificar los procedimientos de estimación de los índices empleados en los sistemas de salud pública tales como las tasas de incidencia, morbilidad, mortalidad y letalidad, intensidad y severidad del riesgo para realizar proyecciones temporales y espaciales.
5. Incorporar el concepto de *privación absoluta y relativa* en las estimaciones del potencial tiempo de vida perdida como consecuencia de un evento de tránsito.
6. Diseñar las herramientas que permitan estimar y proyectar la evolución de la mortalidad en distintos grupos poblacionales mediante un enfoque prospectivo que permita el análisis territorial.
7. Evaluar el impacto de los eventos de tránsito en la dinámica de las defunciones totales y las variaciones demográficas.
8. Analizar los posibles efectos Edad, Cohorte y Periodo en México para las series de tiempo.
9. Ampliar el modelo de competición de riesgos para estimar las funciones de distribución de probabilidades de los distintos tipos y clases de eventos de tránsito en una población acotada en tiempo y espacio.
10. Estimar los índices de todos los componentes del modelo en las tres escalas administrativas: nacional, estatal y municipal, con base en los datos públicos generados por organismos oficiales de México.

Material y métodos

Diseño general

Para dar cuenta de los distintos fenómenos asociados a los ET, se propone analizar las tres escalas administrativas: nacional, estatal y municipal, con el fin de reconocer los atributos, variables y

⁴ La exactitud de un sistema de medición tiene tres componentes: sesgo, linealidad y estabilidad. La precisión de un sistema de medición tiene dos componentes: repetibilidad y reproducibilidad (Kitchenham, 2001).

parámetros, en distintos agregados territoriales, mediante la articulación e integración de los siguientes enfoques:

1. *Epidemiología social*, para reconocer los determinantes sociales y comprender por qué algunos grupos de individuos se ven involucrados en ET y otros no, procurando herramientas para discernir las fuentes de cambio en la mortalidad que experimenta una población a lo largo del tiempo.
2. *Brechas en el espacio geográfico*, para señalar el estado y evolución del fenómeno en el territorio nacional.
3. *Evolución de las series de tiempo*, para conocer la magnitud del fenómeno, estimar sus variaciones y proyectar su probable evolución.
4. *Dinámica demográfica*, para incorporar indicadores asociados con la dinámica poblacional y realizar estimaciones estables de largo plazo con base en los registros.

Tipo de estudio

Este proyecto de investigación constituye un aporte teórico y empírico al estudio científico de los ET que realiza múltiples análisis secundarios, lo que supone un avance secuencial sobre tres componentes complementarios:

1. Desarrollo del modelo con base en las definiciones y herramientas teóricas de los procesos estocásticos y la teoría del riesgo.
2. Formulación de las ecuaciones con base en las definiciones de los indicadores existentes de incidencia, letalidad, morbilidad y mortalidad.
3. Estimación de las métricas con base en un análisis secundario de los datos oficiales disponibles con periodicidad anual y mensual a escala nacional, estatal y municipal, con el fin de analizar la evolución espacial y temporal del conjunto de indicadores asociados a los eventos de tránsito.

Universo de estudio

En México existen diversos procedimientos y protocolos para la certificación y registro de las defunciones, no obstante, la fuente de información consolidada es única y está a cargo del Sistema de Estadísticas Vitales, una de las fuentes de información demográfica con mayor tradición cuyos antecedentes se basan en los registros parroquiales que realizaba la Iglesia Católica en la Nueva España para consignar y administrar los bautizos, matrimonios y entierros de la época y que, durante siglos,

fueron la única fuente de información demográfica de la República, lo que permitía estudiar y realizar estimaciones sobre diversas dinámicas y fenómenos demográficos.

Con el fin de estructurar esta información en el país, INEGI, en calidad de agencia auspiciadora y como parte de sus tareas institucionales, participa en la consolidación, de la estadística de defunciones generales para gestionar y publicar todos los datos relativos con el debido aseguramiento técnico para el resguardo de la calidad de los datos.

Para generar la estadística de defunciones generales, INEGI ha adoptado la metodología y las recomendaciones internacionales emitidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (INEGI, 2020), a partir de la cual se establecen las normas, conceptos y procedimientos que estandarizan las actividades de recolección y consolidación en los diferentes países adscritos. Además, para cumplir el objetivo de garantizar la comparabilidad internacional, también se aplican las normas y reglas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y se emplea el catálogo previsto en la *Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE)* y la *Ley General de Salud* (INEGI, 2020).

Los datos de defunciones provienen de los registros administrativos, por lo cual la unidad de análisis son propiamente las defunciones generales registradas en las Oficialías del Registro Civil, el Servicio Médico Forense (SEMEFO) y las Agencias del Ministerio Público en México. Tomando en cuenta las consideraciones planteadas, existe consenso en que la calidad de los datos reportados por INEGI es, en general bastante buena (#), lo que permite extender estos conceptos para realizar mejores estimaciones a partir de las siguientes definiciones.

El estudio brinda estimaciones y resultados con datos de la República Mexicana en sus tres escalas administrativas. Para llevarlos a cabo, se emplearon las bases de datos consolidadas por organismos oficiales en dos formatos:

I. Datos tabulares con campo llave

1. Indicadores demográficos 1990-2010 y Proyecciones demográficas 2010-2050⁵
2. Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas (ATUS) 1997-2016⁶
3. Estadísticas Vitales y Defunciones Generales y Fetales (EVDGF) 1997-2016⁶
4. Censos de Población y Vivienda 1990, 2000 y 2010, 2018⁵
5. Módulos de Condiciones Socioeconómicas de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (MCS-ENIGH) 2010 y 2014 y el Módulo de Condiciones Socioeconómicas 2015⁶

⁵ Elaboradas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), actualizados al 23 de octubre de 2018.

⁶ Elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), actualizadas al 27 de marzo de 2018.

6. Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda, 2010⁶
7. Características de las localidades y del entorno urbano. México, 2010⁶
8. Grado de accesibilidad a carretera pavimentada 2008-2016, actualizada a 2018⁶
9. Medición de la pobreza en México 2010-2015, por entidades federativas y municipio, 2018⁷
10. Resultados de pobreza en México 2008-2018, a nivel nacional y por entidades federativas⁷

II. Datos espaciales con proyección geográfica

1. Marco geoestadístico nacional versión 5.0. México, 2018⁷
2. Censo de Población y Vivienda 2010. México, 2018⁷
3. Red Nacional de Caminos RNC. México, 2018⁷
4. Capa ráster del Continuo de Elevaciones. México, 2012⁷
5. Capa vectorial de Uso de Suelo y Vegetación serie VI. México, 2014⁷

Gestión y resguardo de datos

Los datos se integraron en dos conjuntos de datos multinivel a partir de la integración de diferentes capas y bases de datos consolidadas provenientes de fuentes oficiales. La arquitectura de los datos se basará en el modelo de entidad-relación de INEGI, por lo que la estimación de los índices de incidencia, letalidad y mortalidad se llevaron a cabo a través de procesos de *Extracción-Transformación-Carga* (ETL, por sus siglas en inglés) sobre los campos originales señalados en los diccionarios de datos propuestos por INEGI (2020) y CONAPO (2018), lo que permitirá su replicabilidad en forma inmediata y transparente.

La integración con estimaciones agregadas a nivel territorial será realizada a través de los campos de identificación para las distintas escalas mediante el sistema de coordenadas geográficas WGS84. El diccionario, modelo de datos y otros detalles están disponibles en:

<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/registros/economicas/accidentes>.

Para estimar las variaciones anuales e interanuales, se analizaron los datos primarios a nivel de registro y después se estimaron los indicadores agregados en las distintas escalas territoriales para transformarlos a tasas correspondientes de acuerdo con la representación del indicador.

Análisis de datos

⁷ Elaboradas por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL).

Las fuentes de datos originales se encuentran en diversos formatos digitales y poseen distintos atributos. Por este motivo, fue necesario normalizarlos y almacenarlos en un sistema único que garantiza la consistencia e integridad durante su explotación. Para cumplir con este fin y que los procedimientos sean completamente reproducibles y accesibles en forma amplia, se procuró el uso de software libre^{8,9}, de acuerdo con lo siguiente:

- **Julia v1.1**: para gestión y minería de bases de datos.
- **Rx64 3.5.0**: estimaciones de tasas, métricas e indicadores, así como el diseño de modelos.
- **Orange 3.3.8**: modelos estadísticos multivariados, análisis de series de tiempo.
- **QGIS Desktop 3.6.1**: proyección geográfica, análisis cartográfico y modelos espaciales.

El volumen inicial del conjunto de datos alcanzó 30 GB y los archivos de análisis y edición están alrededor de los 100 GB, lo que superó a los equipos con diseño comercial y tuvo que ser cubierto mediante servicios de *Cloud computing*¹⁰ para aumentar la capacidad de procesamiento bajo demanda, especialmente para garantizar las capacidades de cálculo, la velocidad de procesamiento y garantizar que el almacenamiento de datos se realizara mediante bloques con respaldos activos.

Sistema de citación

El sistema de citación que se utilizará en la tesis doctoral es el de la *American Psychological Association* (APA), en su Sexta Edición.

⁸ Entendido como la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar y transformar el software.

⁹ Salvo en aquellos casos en que sea imprescindible el software comercial por motivos de calidad o eficiencia.

¹⁰ A través de servicios de soportados por Rackspace.

Estructura de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta un panorama global de los ET y la evolución de los paradigmas en el estudio del tránsito, las cifras dan cuenta de las dificultades pasadas, actuales y futuras para atender las distintas problemáticas en diversos estratos y grupos poblacionales, para lo cual se revisa el estado del arte y se realiza un análisis de la sociedad del riesgo y de los conceptos azar, determinismo y complejidad para plantear elementos de discusión sobre las ventajas de desarrollar un marco estocástico para estudiar los ET en el ámbito de la Geografía del no-equilibrio (Pumain, D., 2017).

En el Capítulo 2 se desarrollan un conjunto de ecuaciones basadas en las herramientas de la Teoría del riesgo, el Cálculo Actuarial, el Análisis estadístico y las Series de tiempo, para abordar los fenómenos de ocurrencia, frecuencia, incidencia, letalidad y mortalidad por eventos de tránsito, ofreciendo un marco analítico y un conjunto de herramientas que, sin ser exhaustivas, a través de las ecuaciones señalan los métodos que pueden utilizarse para ampliar o profundizar en el estudio de cada índice de riesgo latente, así como llevar a cabo los procesos de estimación, sobre todo de aquellos mediante los cuales se podría establecer un conjunto de indicadores nacionales, los cuales permitirían plantear, monitorear y rendir cuentas sobre los objetivos de mejora en diversas escalas territoriales y temporales de forma clara y transparente.

El Capítulo 3 se enfoca en la severidad de los ET, así como en la morbilidad y mortalidad que estos producen, mediante la modelación de los diversos riesgos a partir de la composición de procesos estocásticos, permitiendo la estimación de la intensidad de los riesgos en todos los grupos poblacionales, los tiempos de latencia y el tiempo de vida potencialmente perdido por una población acotada. A partir de estos pilares se construye el índice de privación de tiempo de vida con base en los conceptos de privación absoluta y relativa, reconociendo las defunciones por ET como un fenómeno colectivo y sugiriendo que la realización de los riesgos latentes supone una pérdida socialmente distribuida, lo que se estima mediante una ecuación de equiparación entre edades que puede estimarse a través de las variaciones en la incidencia e intensidad del fenómeno, permitiendo el análisis de su distribución espacial y temporal.

Por último, en el Capítulo 4 se extienden los modelos para considerar familias de riesgos que compiten entre ellos por ocurrir en una población con distintas características de exposición y vulnerabilidad, permitiendo el estudio desagregado de las defunciones por tipo de usuario y tipo de evento. Desde esta perspectiva ampliada, la coexistencia de los procesos de riesgo produce la evolución dinámica de los riesgos en una población que reacciona de múltiples formas en condiciones fluctuantes, lo que produce que todas las estimaciones sean dinámicas, condicionales y dependientes del espacio, del momento de observación y del grupo poblacional observado.

Capítulo 1

Riesgo y complejidad en el espacio geográfico

‘The work of science is to substitute facts for appearances
and demonstrations for impressions.’

John Ruskin. *Unto this last* (1860)

‘No podemos imaginarnos la ciencia tal y como la conocemos si, para
estudiar cualquier cosa, tuviéramos que ir a lo infinitamente pequeño de sus
componentes.’

Germinal Cocho. *Patrones y procesos en la naturaleza* (2009)

El objeto de la investigación geográfica puede comprenderse como la explicación del ‘sistema de interacciones que comprende toda la humanidad y su medio ambiente natural sobre la superficie de la tierra’, lo que implica el reconocimiento de diferencias y asimetrías entre regiones y civilizaciones con el fin último de explicar la gran variedad de paisajes, formas y estilos de vida en el planeta. Por tanto, su objeto de estudio —como toda forma de vida— se encuentra naturalmente fuera del equilibrio y sus dinámicas están siempre en el borde del caos (Johnson, J., et al., 2017).

A pesar de que la geografía refiere con poco entusiasmo al concepto de equilibrio, sus corrientes ortodoxas se basan en una visión de equilibrio en todas partes (Fingleton, B., 2000). A menudo, para las asimetrías observadas se encuentran explicaciones demasiado ad hoc sobre qué y cómo ha ocurrido un fenómeno, en vez de hallar sus regularidades dinámicas (Behrens, K., & Picard, P. M., 2011; Rubtzov, V. A. et al., 2015). Como muchos otros especialistas en diversas disciplinas, es probable que los geógrafos hayan dedicado una gran cantidad de ingenio al tratar de explicar cómo surgen las asimetrías como un proceso que se aleja del equilibrio, aceptando o formulando que la tendencia natural, de no existir alguna disrupción específica, sería la convergencia a estados regulares en un sistema más o menos homeostático que tiende al equilibrio.

El concepto de equilibrio apareció en la escena geográfica como parte de la modernidad y se convirtió en el punto de apoyo del constructo ‘seguridad’ instalado en el núcleo del diseño social de los últimos siglos. Desde luego, estos conceptos permearon profundamente a la geografía urbana, lo que se observa cotidianamente en los discursos sociales y políticos orientados a diseñar ‘ciudades seguras y en equilibrio’. No obstante, a pesar de que las ciudades parezcan estables en su estructura durante largos períodos de tiempo, incluso si solo se refiriese a su dimensión espacial, esta percepción es claramente superficial (Garretsen, H., & Martin, R., 2010; Johnson, J., et al., 2017).

En gran medida, la visión de las ciudades en equilibrio nace de pensar en ellas estáticamente, una falacia, pues las ciudades habitadas ‘están vivas’ y son, en realidad, una expresión nítida de sus dinámicas socioculturales, por lo que siempre se encuentran fuera del equilibrio, ya que la tensión entre las fuerzas que se descomponen y se acumulan en diversas escalas espaciales y temporales — algunas compensatorias—, se fusionan mediante la fuerte volatilidad y heterogeneidad de los procesos de urbanización.

Ahora bien, aunque esta investigación es un trabajo con núcleo geográfico, el enfoque de este proyecto pretende promover el análisis de parcelas de la realidad un poco más allá del ámbito geográfico, por lo que no propone al equilibrio como premisa ni como conclusión, sino que sugiere la validación empírica como el aspecto central de los modelos propuestos como un componente esencial de los postulados teóricos, fomentando la idea de que las ciudades son estructuras disipativas de energía que

se mantienen fuera del lejos del equilibrio, lo que remita a las ideas semilla de la innovación y el cambio tecnológico que condicionan su dinámica.

Como lo que sucede en las ciudades está cada vez más desconectado de su forma física, los cambios en el entorno construido en el mundo contemporáneo están siempre fuera de sincronía con los ajustes a los comportamientos humanos. Esta asincronía invisibiliza los efectos de las variaciones en la intensidad de las actividades y los patrones de movilidad, provocando que las consecuencias adversas de los altos volúmenes de interacciones —enfermedades, robos, asesinatos, distintos tipos de violencia, eventos de tránsito, etcétera—, sean considerados por la mayoría de los habitantes de las ciudades como ‘fuera de la norma’, aunque en realidad estos sean un resultado esperado y absolutamente ordinario desde un punto de vista más neutral.

1.1 Panorama global de los eventos de tránsito

Los mayores desafíos de la sociedad actual se han condensado en los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS), un llamado universal desplegado en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2016) al que los gobiernos de 193 países se comprometieron a emprender acciones sobre un ‘conjunto de 17 objetivos y 169 metas destinadas a resolver los problemas sociales, económicos y ambientales que aquejan al mundo’, lo cual se monitorea mediante una agenda programática de 15 años que ha sido denominada la *Agenda 2030*. El ODS-3 atiende a la salud y el bienestar y en la meta 3.6 se propone ‘Para 2020, reducir a la mitad el número de muertes mundiales y lesiones causadas por accidentes de tránsito’ (ONU, 2015), un objetivo muy ambicioso que retoma iniciativas previas, en particular el *Decenio de Acción para la Seguridad Vial* (DASV), para señalar la urgencia global de abatir las consecuencias de este profundo problema de salud pública.

Históricamente, los eventos de tránsito han sido denominados ‘accidentes de tránsito’, este asunto es algo más relevante que un aspecto de forma, como señala el *British Medical Journal* (BMJ) ‘Durante muchos años, los funcionarios de seguridad y las autoridades de salud pública han desalentado el uso de la palabra ‘accidente’ cuando se refiere a lesiones o los eventos que las producen. A menudo se entiende que un accidente es impredecible —un hecho fortuito o un ‘acto de Dios’— y, por lo tanto, inevitable. Sin embargo, la mayoría de las lesiones y sus eventos precipitantes son predecibles y evitables (Davis, R. M., & Pless, B., 2001; Neira, J., & Bosque, L., 2004; Pérez, M. R., 2011).

A partir de estos argumentos, el BMJ decidió prohibir la palabra accidente hace ya bastante tiempo y, a pesar de que muchos profesionales de la comunidad científica, autoridades y tomadores de decisiones se han sumado a la iniciativa, en la mayoría de los países se sigue escribiendo, concibiendo y

atendiendo precisamente como un accidente: algo que es inevitable y que, por lo tanto, no existe responsabilidad política ni de sus autoridades en su ocurrencia, lo que explica en gran medida el lamentable panorama global de los ET y sus fatales consecuencias.

Como resultado de las actividades de investigación y de los diversos estudios llevados a cabo en varios países, se sabe que las lesiones causadas por los ET permanecen como uno de los más importantes problemas de salud pública y que cada vez cobra más víctimas. En el año 2000, los ET fueron la décima causa de mortalidad mundial con 1.17 millones y en 2018 se situó en la octava posición: de los 56,4 millones de defunciones registradas en el mundo, más de 1.35 fueron por ET, es decir, una persona murió en un ET cada 25 segundos (Salud Global, 2018) y entre 20 y 50 millones de personas sufrieron lesiones graves (WHO, 2019).

Adicionalmente, las personas de entre 15 y 44 años representaron en 2019 el 48% de las muertes totales y los hombres exhibieron una mayor propensión que las mujeres a fallecer en un ET, además, 74% de todas las defunciones por esta causa ocurren en hombres menores de 25 años (WHO, 2019).

A pesar de su predominancia, los ET son un fenómeno relativamente reciente. Diversos registros históricos mencionan que el 17 de agosto de 1896, Bridget Driscoll se convirtió en la primera víctima mortal de un ET al ser atropellada por un coche al atravesar los jardines del palacio. Se estima que el auto circulaba a 12,8 km/h cuando el límite máximo era de 6,4 km/h; el responsable de la investigación afirmó: ‘Esto no debe volver a ocurrir nunca más’ (Road Safety, 2018).

Desafortunadamente, a pesar de esa sentencia, los ET no solo han vuelto a ocurrir, sino que se han convertido en una pandemia de enormes proporciones a escala global, por lo cual, en abril de 2004, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó el *Folleto para el Día Mundial de la Salud* con el tema *La seguridad vial no es accidental* (WHO, 2004). Uno de sus primeros párrafos, detonante de esta investigación, señala:

‘Los traumatismos causados por el tránsito se pueden predecir y prevenir en gran medida; se trata de un problema causado por el ser humano que cabe someter a un análisis racional y a la aplicación de medidas correctivas. La [in] seguridad vial es un problema multisectorial y de salud pública, todos los sectores, incluido el de salud, deben asumir plenamente su responsabilidad y desplegar actividades y campañas de promoción de la prevención de los traumatismos causados por el tránsito. Los errores corrientes de conducción y el comportamiento común de los peatones no deberían ocasionar traumatismos graves ni defunciones. Los sistemas de tránsito deberían ayudar a los usuarios a enfrentar airoosamente situaciones cada vez más difíciles. La vulnerabilidad

del cuerpo humano debería ser un parámetro determinante del diseño de los sistemas de tránsito, y en estos el control de la velocidad es esencial’.

Unos años después de esta publicación, la OMS impulsó una agenda para producir el primer *Global status report on road safety* (Toroyan, 2009) en donde se señala que los ET ocupan el primer lugar como causa de muerte entre las lesiones por causa externa y son el noveno contribuyente a las enfermedades, lo que ya entonces representaba una enorme carga para los sistemas de salud, particularmente en los países con ingreso medio y bajo (WHO, 2009; WHO, 2015). Diversas estimaciones realizadas en esos años coincidían en que cerca de la mitad de los que fallecen en las carreteras por ET son ‘usuarios vulnerables’: peatones, ciclistas y motociclistas (Hidalgo-Solorzano E. et al., 2009; Rodrigues J. et al., 2014; Muro-Báez VA, 2017), por lo que, además del enorme número de víctimas mortales, el fenómeno continúa acumulando millones personas con discapacidad permanente todos los años (WHO, 2013; WHO, 2015; WHO, 2018).

Dada la magnitud de las cifras, la evolución histórica de las defunciones y su aumento incipiente en todo el mundo, en marzo de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó que el periodo 2011-2020 sería el *Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020*, que tendría por objetivo general ‘estabilizar y, posteriormente, reducir las cifras previstas de víctimas mortales en accidentes de tránsito en todo el mundo’ (ONU, 2010).

Esta declaración propició diversas acciones dedicadas a la contención y prevención a nivel mundial, por lo que varias naciones impulsaron la creación y mejora de sus sistemas de monitoreo y registro con la intención de evaluar periódicamente la evolución de sus niveles de inseguridad vial y diseñar políticas públicas para reducir el impacto de los ET en su población (WHO, 2015), lo que en algunos casos significó una gran inversión monetaria que deberá revisarse desde el inicio del año 2021.

Por la relevancia del fenómeno en materia económica y social, la *Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos* (OCDE) también publicó en 2009 el *Road Safety Annual Report*, un estudio que se ha mantenido hasta estos días como un semáforo para los países participantes y que sirve para diseñar, implementar y compartir políticas, estrategias y experiencias de seguridad vial (Janstrup, K. H., 2017)), lo que ha generado una comunidad internacional de profesionales de la salud, urbanismo, ingeniería, geografía, estadística, ciencias de la computación y muchas otras disciplinas, que abona cotidianamente a la investigación científica mediante diversos análisis, propuestas de intervención y medios de difusión enfocados en llamar la atención de los gobiernos y sus autoridades para destinar recursos y esfuerzos a esta importante fuente de mortalidad.

Con la intención de coordinar estas múltiples iniciativas, la ONU comenzó a promover la *Semana Mundial de Seguridad Vial* a través de *Road Safety Collaboration*, la intención fue abordar los factores claves de riesgo de muerte y lesiones, una iniciativa que obtuvo amplia participación mundial con más de 90 países en su quinta edición celebrada en 2019 (Road Safety Collaboration, 2019), como se observa en el Mapa 1.1.

Mapa 1.1. Eventos celebrados en la *Cuarta Semana Mundial de Seguridad Vial*



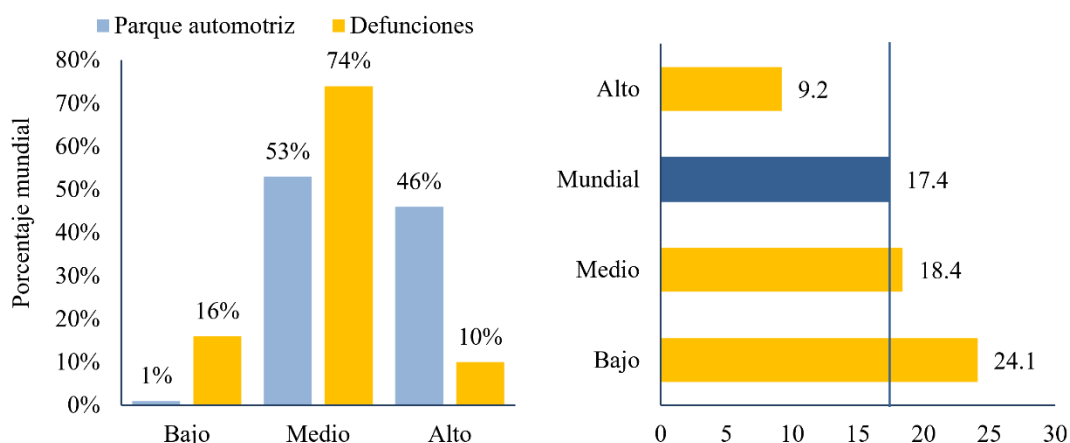
Fuente: Recurso digital de *Fourth United Nations Global Road Safety Week*.

A pesar de todas estas acciones, la situación actual de los ET sigue representando un enorme desafío, ya que también se trata de un problema de desigualdad en el que, a pesar de que los países con ingresos bajos y medios apenas poseen la mitad de los vehículos del mundo, ahí se acumula el 90% de las víctimas fatales por ET, por lo que su tasa de mortalidad es tres veces mayor que en los países de ingresos altos (Ávila-Burgos L, 2011; WHO, 2018), constituyéndose en una de las principales causas de mortalidad prematura (WHO, 2015).

En la Figura 1.1 se muestran las tasas de mortalidad de los países agrupados por su nivel de ingreso: los de nivel alto tienen una tasa de 9.2 defunciones por cada 100,000 habitantes, los de ingreso medio 18.4 y los de ingreso bajo 24.1, superando en 38.5% a la media mundial de 17.4 por cada cien mil.

Adicionalmente, desde el punto de vista económico y financiero, la incidencia y letalidad de los ET comienzan a ser determinantes sociales, ya que sus efectos superan el 3% del producto interno bruto de la mayoría de los países (Burns, 2016), un presupuesto cercano al destinado a educación básica en los países de ingresos bajos y medios (Dalal K, 2013; Sánchez-Restrepo H. , 2020).

Figura 1.2. Defunciones mundiales por ET con base en el nivel de ingreso de los países



Fuente: Elaboración propia con base en el *Global Status Report on Road Safety 2018*.

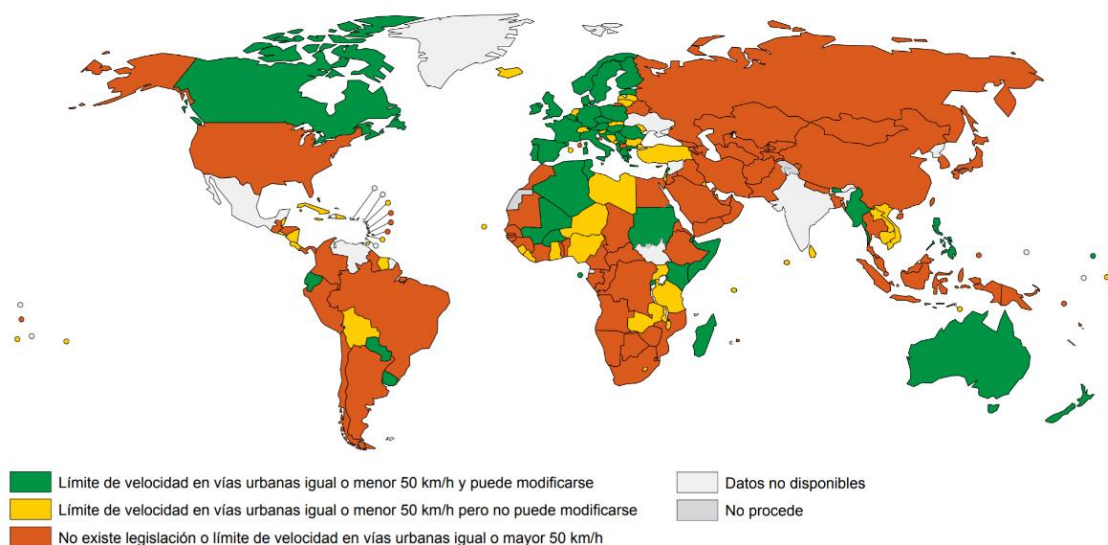
1.1.1 Regulaciones y marco normativo

Dado que los países se han comprometido a disminuir el número de eventos y defunciones por ET, existen diversas iniciativas enfocadas mejorar las regulaciones de los usuarios de vehículos automotores, la calidad de las infraestructuras destinadas al tránsito y las reglas que norman la circulación, no obstante, la existencia de vacíos en los marcos legales de la mayoría de los países, así como su falta de aplicación, señalan enormes retos en el ámbito legal que apoyen a reducir los ET en forma sustantiva.

Asimismo, aunque aún es necesario obtener evidencias robustas sobre las conductas en ambientes no controlados, diversas estimaciones señalan que el aumento de la velocidad en la circulación se relaciona directamente con la probabilidad de producir una colisión y agravar las consecuencias del impacto. Hasta ahora, es ampliamente difundido que, por cada kilómetro por hora adicional a la velocidad promedio de circulación de un vehículo, aumenta la incidencia de los eventos que producen lesiones en 3% y los eventos fatales entre 4% y 5% (WHO, 2017). Adicionalmente, la probabilidad de fallecer de un peatón adulto que es golpeado por un automóvil que circula a 50 km/h es inferior a 0.2, no obstante, la probabilidad de defunción aumenta a 0.6 si la velocidad es de 80 km/h (WHO, 2017).

Por otro lado, el diseño de las vías también puede tener un impacto considerable en la inseguridad vial, idealmente, su diseño debe tener en cuenta la seguridad de todos los potenciales usuarios, lo que implica construir espacios adecuados para peatones, ciclistas, motociclistas y otros vehículos que participen en la movilidad. Además, todos los países deberían contar con regulaciones técnicas sobre límites de velocidad en las vías, sin embargo, en la mayoría no existe legislación sobre este punto, como muestra el Mapa 1.2.

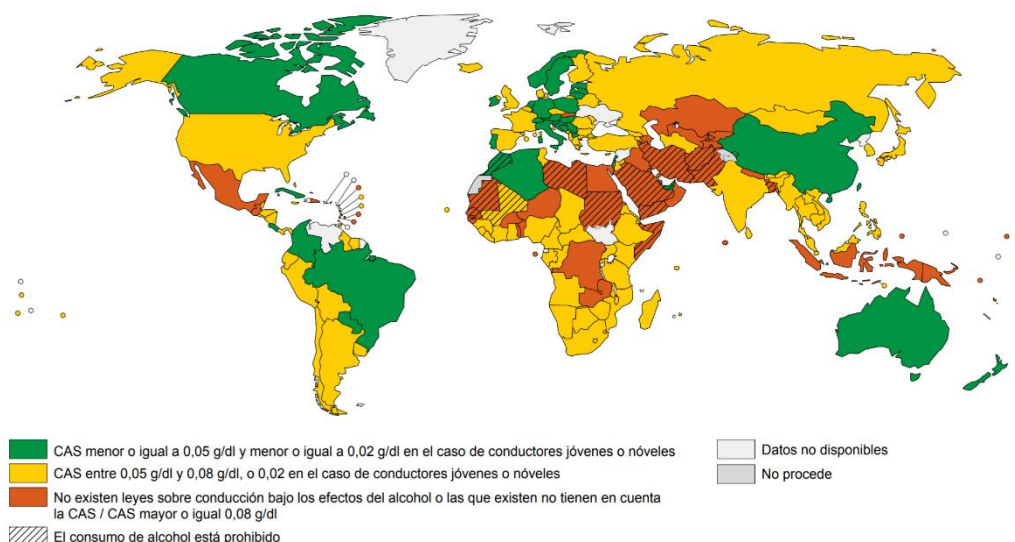
Mapa 1.3. Legislación sobre límites de velocidad en ciudad, por países o zona



Fuente: Tomado del *Global Status Report on Road Safety 2018*.

Otro catalizador en diversos países es la conducción bajo el efecto del alcohol o una sustancia psicoactiva. Respecto a la ingesta de alcohol, el riesgo comienza con baja concentración en la sangre y aumenta significativamente al superar los 0.04 g/dl (WHO, 2018). Sin embargo, la evidencia parece ser insuficiente para que todos los países emitan regulaciones, como se observa en el Mapa 1.3.

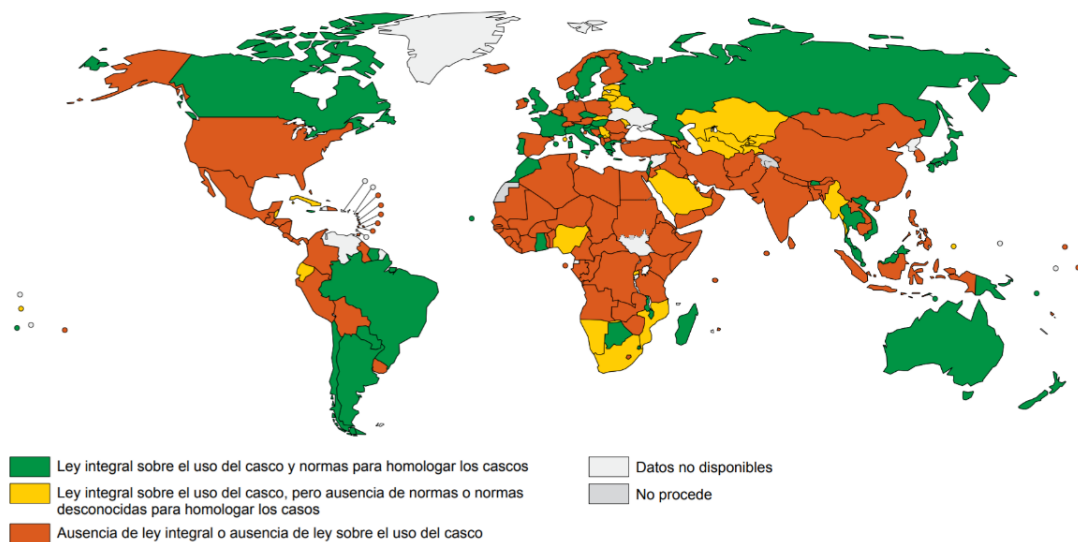
Mapa 1.4. Leyes sobre conducción bajo los efectos del alcohol, por países o zona.



Fuente: Tomado del *Global Status Report on Road Safety 2018*.

Existen investigaciones que muestran que la implementación de los componentes para atenuar el riesgo tiene un rol central en la letalidad de los ET. Por ejemplo, utilizar correctamente el casco de la motocicleta reduce la probabilidad de muerte en 40% y las lesiones graves en más del 70% (Ramírez Muñoz, J. E., 2013; Rodrigues J. et al., V. A., 2014; Berrones-Sanz, L. D., 2017).

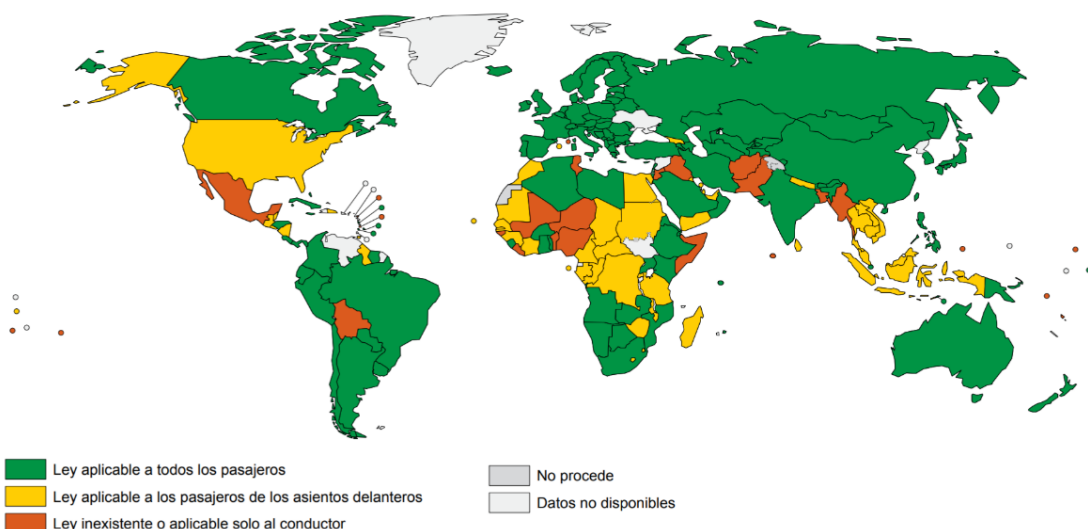
Mapa 1.5. Leyes sobre el uso del casco y normas para homologarlos, por país o zona



Fuente: Tomado del *Global Status Report on Road Safety 2018*.

Estos datos suponen un gran avance frente al aumento de vehículos con menos de cuatro ruedas, sobre todo porque, a pesar de ser uno de los principales grupos de víctimas, como muestra el Mapa 1.4, la mayoría de los países carecen de regulación sobre la homologación, la calidad de los aditamentos y el uso apropiado del casco. Diversos estudios señalan que el uso del cinturón de seguridad reduce la muerte entre los pasajeros del asiento delantero en casi 50% y el de los otros pasajeros en un rango entre 25 y 75% (Road Safety, 2018). El Mapa 1.5 muestra que 105 países ya promulgaron leyes sobre el uso del cinturón de seguridad de todos los pasajeros, lo que abarca el 67% de la población mundial.

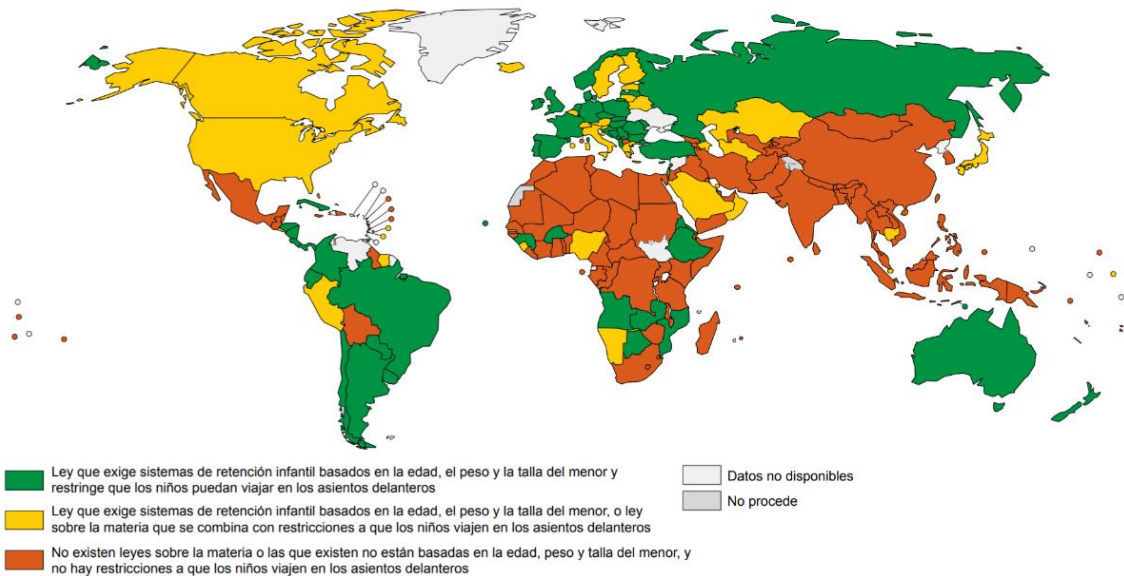
Mapa 1.6. Leyes sobre el uso del cinturón de seguridad, por país o zona



Fuente: Tomado del *Global Status Report on Road Safety 2018*.

A partir de estas cifras, otro gran paso para aminorar las consecuencias de los ET, son los sistemas de sujeción infantil, los cuales reducen en 70% las defunciones de menores de un año y entre 54 % y 80% en los niños más grandes (WHO, 2018). Sin embargo, la mejora de los dispositivos no es el factor más relevante, la obligatoriedad de su uso y promover que los niños viajen en la parte trasera del vehículo implica el cambio sustantivo.

Mapa 1.7. Leyes sobre el uso de sistemas de retención infantil por país o zona



Fuente: Tomado del *Global Status Report on Road Safety 2018*.

El Mapa 1.6 muestra que, actualmente, solo 53 países han desarrollado leyes para regular los sistemas de retención infantil basadas en la edad, la altura y el peso del menor. Como ocurre en todos los ámbitos, la legislación solo es relevante si se implementa en forma plena y frontal, sobre todo porque existen estudios de caso que señalan dificultades para llevar a cabo un control, incluso en los países de ingresos altos; además, en algunos países, el costo de los sistemas no está al alcance de todos los habitantes con automóvil, lo que plantea el reto de crear políticas públicas integrales.

Asimismo, existen muchos tipos de distracciones que pueden deteriorar la calidad de la conducción. Los teléfonos móviles son un aspecto cada vez más relevante en la ocurrencia de ET, aunque es necesario realizar estudios más controlados para conocer su magnitud y detalles en situaciones específicas, algunas estimaciones señalan que las personas que utilizan el teléfono mientras conducen poseen cuatro veces más probabilidades de verse involucrados en un ET que aquellos que no lo usan durante la conducción; además, diversas evidencias señalan que los teléfonos con manos libres no son mucho más seguros (WHO, 2018) algo que podría cambiar con el tiempo y volverse más seguro y confiable conforme la tecnología se adapta mejor a los usuarios y la automatización de tareas se vuelve más efectiva.

Otro aspecto vital reside en la calidad de la seguridad de los vehículos para evitar y reducir la probabilidad de lesiones graves durante los choques. Si bien hay una serie de normas y parámetros sobre aspectos de seguridad en los vehículos, los países no siempre aplican los estándares de fabricación y producción, sobre todo por cuestiones financieras, lo que pone en riesgo las vidas de manera innecesaria.

La forma de evitar estas dificultades adicionales es aparentemente simple: exigir que ‘los fabricantes de vehículos cumplan con las regulaciones de impacto frontal y lateral, que incluyan control electrónico de estabilidad y velocidad y que aseguren que las bolsas de aire y los cinturones de seguridad estén instalados en todos los vehículos’. Sin estas normas básicas, el riesgo de lesiones causadas por el tránsito, tanto en el vehículo como fuera de él, aumenta considerablemente. No obstante, los costos asociados a algunos automóviles con estas características mínimas pueden desalentar a los compradores, lo que produce distorsiones que culminan en la ausencia o evasión de la regulación (Akerlof, G. A., 1978); Leland, H. E., 1979).

Con base en lo anterior, se puede alertar de que, si existe una inadecuada aplicación de las leyes de tránsito o sobre diversos riesgos como conducir bajo los efectos del alcohol, el uso del cinturón de seguridad, los límites de velocidad, los cascos y los sistemas de seguridad para niños, será imposible evitar las muertes y lesiones para las que fueron creados (Vera-Lopez JD, 2013). Por lo tanto, la aplicación estricta de las leyes de tránsito es un reto político y social que las autoridades deben enfrentar con racionalidad para aumentar las posibilidades de modificar conductas de riesgo y reducir sus efectos en los riesgos generalizados a la salud de los habitantes y sus sistemas de seguridad social.

1.1.2 Conjuntos informativos

Durante su desarrollo histórico, en los ET ha dominado la ‘naturaleza azarosa’ del fenómeno, lo que generó modelos que no incluyeron estructuras causales ni diferenciación en las dinámicas entre las distintas escalas y estructuras territoriales. Asimismo, en la mayoría de los sistemas de registro, las características sociales, económicas o culturales de los conductores, pasajeros o peatones aparecen como elementos accesorios con nula o muy baja calidad de registro (Vasconcelos A. et al, 2016), propiciando que el estudio de la vulnerabilidad comience a ser un tema relevante de manera reciente, cuando en realidad es un punto medular de la siniestralidad (Chong, 2010; Peng, 2012; Blaziot, 2013).

El punto anterior se entrelaza con los aspectos relacionados con la exposición, la cual se manifiesta claramente a través de la ausencia generalizada de datos e información de calidad sobre aspectos relevantes de la dinámica vial y los agentes involucrados, dando como resultado un conocimiento muy

limitado sobre los diferentes tipos y niveles de amenazas, exposición y vulnerabilidad asociados a la ocurrencia de las distintas clases de ET (Badea-Romero, 2013; Hollingworth, 2015).

En este sentido, de acuerdo con el valioso análisis sobre ‘El estado de los sistemas nacionales de información’, generado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) a través de sus seminarios *Programas para la Mejora de la Seguridad Vial*, se sabe que la calidad de los procesos de recolección de datos y la elaboración de ‘indicadores de siniestralidad vial en los países Latinoamericanos’ tiene bastantes desafíos (OPS, 2016). Entre los resultados vertidos en sus informes, destaca que solo nueve países declaran contar con un sistema nacional de información de ET y que en algunos aún no son confiables debido a que se crearon recientemente. Además, el reporte señala que el sistema nacional se define de forma diversa con aportes de las oficinas de salud y de estadística, aunque ‘en la amplia mayoría de los casos, está constituido exclusivamente por registros de los cuerpos policiales’.

Otro hallazgo significativo de este reporte es que las encuestas no coinciden ni en la propia definición de ‘accidente’, donde pueden intervenir requisitos como ‘estar implicado al menos un vehículo de motor, haber algún vehículo en movimiento u ocurrir en una vía pública’ (OPS, 2009). Por otro lado, si bien es cierto que en todos los países se recogen datos sobre los fallecidos y los heridos de cualquier gravedad, solo en ocho existe un procedimiento para que las lesiones no mortales se clasifiquen de acuerdo con su gravedad y se registre a los eventos con hospitalizados y a aquellos con daños materiales. Asimismo, aunque todos los países que poseen un sistema nacional de información producen bases de datos nacionales —o están trabajando en producirla—, no todas poseen protocolos de normalización; de hecho, en tres países ni siquiera se dispone de un cuestionario único y en los demás casos existen grandes espacios entre los periodos establecidos para cada revisión del cuestionario y la base de datos.

Adicionalmente, el informe reporta que, en al menos siete países de Latinoamérica, existen bases de datos alternativas a los registros policiales, siendo los más frecuentes las bases de las oficinas estadísticas, hospitales y compañías aseguradoras, por lo que la mayoría de los responsables nacionales considera que ‘la base nacional de accidentes’ presenta carencias (OPS, 2009; WHO, 2015). Así, una de las conclusiones más relevantes de este informe —derivada de las reuniones con los representantes de todos los países—, es que existe un acuerdo generalizado sobre la necesidad de solventar tres puntos:

1. Aumentar la información para estimar costes, datos sobre lesiones y seguimiento de heridos.
2. Incorporar variables sobre el ET e incluir los ET con daños materiales.
3. Aplican reglas de congruencia para asegurar la calidad de la información.

Ante estas evidencias, los atentados a la comparabilidad de los índices entre distintos países se vuelven evidentes, debido principalmente al enorme potencial para la mejora del conocimiento de los ET, por lo que a estas conclusiones podría agregarse la necesidad de garantizar dos propiedades deseables en todos los procesos de medición (Ye, Zhang, & Lord, 2013):

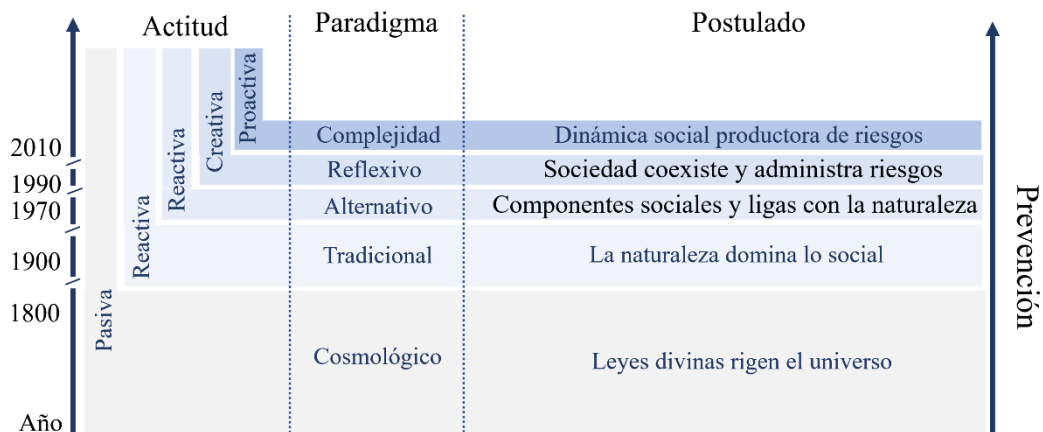
1. **Validez**, que señala en qué grado se mide efectivamente lo que se declara en la medición (Cohen, Manion y Morrison 2000; Darr, 2005).
2. **Confiabilidad**, entendida como la consistencia con que se mide, es decir, la minimización del grado de error presente en la medida (Cohen y Swerdlik, 2009). Se espera que una medición confiable reporte resultados consistentes a lo largo del tiempo y que las variaciones se deban a cambios en el fenómeno.

1.2 La crisis del paradigma tradicional

De acuerdo con Kuhn (1971), ocurre un ‘cambio de paradigma’ cuando se agota una visión y se vuelve necesario revisar su vigencia y cómo se ha llegado a ella, lo que permite dar paso a una más enriquecida. En la Figura 1.2 se presenta la evolución sintética de los paradigmas en el estudio de la ‘accidentalidad vial’, la cual señala el agotamiento del enfoque determinista y la emergencia de otro paradigma que transita del riesgo a la complejidad y que considera a la dinámica social como la fuente generadora de riesgos.

Como en la mayoría de los casos, las explicaciones comenzaron con el *paradigma cosmológico*, el cual ha sido utilizado desde los albores sociales y aún en nuestros días se emplea cotidianamente por diversas personalidades y autoridades. Esta forma de ver el mundo ha servido mucho más para justificar que para explicar los diversos fenómenos adversos a la humanidad, permitiendo que los huracanes, terremotos, sequías, tsunamis, guerras, marchas, hambrunas, pandemias y holocaustos parezcan inevitables, por lo que el componente determinista de esta explicación, aunque provenga de una semilla teológica, enfatiza su gran magnitud para colocarla fuera del ámbito humano y fomentar una actitud pasiva ante su ocurrencia.

Figura 1.8. Evolución de los paradigmas en el estudio de los eventos de tránsito



Fuente: Diseño del autor con base en Chias (2008).

Bajo este arquetipo, los individuos y las instituciones se reconocen y declaran incapaces de prevenir las contingencias y, en consecuencia, los ‘accidentes’ derivados de las ocurrencias, por lo cual la única acción posible para contrarrestar los efectos es reparar los daños, sin que dichas acciones puedan conllevar responsabilidad alguna, una situación ideal para los aparatos de poder que propicia que el esfuerzo para describir, conocer y gestionar las amenazas sea prácticamente nulo y la vulnerabilidad del ser humano sea tan profunda como las circunstancias individuales lo permitan.

Ante la falta de utilidad de este enfoque para la sociedad, el *paradigma tradicional* se abrió paso durante la primera mitad del siglo pasado, el cual se caracteriza por estudiar y reconocer que la naturaleza posee una gran cantidad de energía depositada en aquellos fenómenos que afectan negativamente a la humanidad. Su aporte central es que se atreve a describir y reconocer la periodicidad de ‘las leyes de la naturaleza’ tales como los ciclos hidrológicos, las estaciones del año, los terremotos, las dinámicas geológicas y fenómenos como el del ‘niño’, lo que permite trasladar los poderes de las deidades a la madre natura para explicar variables relacionadas con las amenazas de sufrir catástrofes y eventos de gran magnitud. No obstante, no concibe al riesgo como una variable sino como una fuerza que existe y no es posible modificar, su ocurrencia no se puede prever porque es ‘algo’ latente y la humanidad únicamente puede estar preparada para afrontar sus consecuencias.

Bajo este enfoque, todo lo que atenta contra la sociedad en grandes o pequeñas dimensiones proviene de las fuerzas de la naturaleza, por lo cual las poblaciones humanas padecen y se desarrollan de acuerdo con las condiciones predominantes, en suma: se acepta el determinismo geográfico y social como factores heredados con dinámicas propias. Bajo esta visión, los causantes de cualquier evento adverso a las personas, incluido el tránsito, son siempre caprichos de la naturaleza coludidos con

fuerzas fortuitas e inesperadas, fallas técnicas en el camino, de los vehículos o de los individuos, lo que a menudo concluye con la responsabilidad de las víctimas sobre sus propias tragedias.

En vísperas de la modernidad, el cambio de paradigma se produjo con la producción de las múltiples vertientes teóricas que produjeron que la gestión del siglo XX se viera dominada por el constructo *seguridad*, un eufemismo que provocó la creación de grandes instituciones en los sectores social, salud, alimentación, economía o demografía con el fin de aglutinar los ideales de desarrollo que el Estado debía garantizar. En la realidad, el concepto de seguridad adquirió la connotación de ‘volver a la normalidad tan rápido como sea posible’, lo que se heredó naturalmente a los sistemas de tránsito y sus discordancias. De este modo, la naturaleza dinámica de las ocurrencias se abordó desde una visión estática que promovió una postura reactiva: los ET son completamente aleatorios e imposibles de prevenir, entonces, una vez que un evento ha ocurrido, la misión de las instituciones se debe centrar en contar a los muertos, restablecer a los heridos a un estado de salud estable y resarcir los faltantes derivados del evento, así como liberar vialidades de obstáculos, todo en aras de continuar con las actividades ‘normales’.

Como resultado de esta situación, fue natural estudiar por separado a cada uno de los tres factores propuestos por la escuela clásica: *humano, vehículo y ambiente*, conocidos también como la ‘Trilogía Vial’, el ‘Triángulo de la Seguridad Vial’ o el ‘Triángulo de Seguridad Preventiva’ (Abarca, 2008). Lo que implica que solo pueden existir tres factores que producen ‘accidentes de tránsito’ en el mundo: el *conductor* del vehículo, el *vehículo* y la *vía*. Desde esta perspectiva, el evento se produce cuando existe una falla en al menos uno de los tres ‘componentes relevantes’, a quien siempre se atribuye la ocurrencia, lo que frecuentemente termina señalando al conductor como el responsable más frecuente.

Para conocer este estilo de pensamiento con mayor detalle, se cuenta con una de las obras que lograron condensar las premisas del pensamiento reactivo, un conjunto de folletos que aún alcanzaron a publicarse en 1986 mediante el Instituto de Seguridad y Educación Vial (ISEV) y su *Manual de Seguridad Vial*, obra que jamás fue reeditada, pero que se ha reorganizado y editado hace uno pocos años en forma de fascículos digitales que se enfocan en cinco puntos: *Aspectos generales del tránsito y la seguridad vial, El factor humano, El factor ambiental, El factor vehículo y La circulación*. La obra original lleva por título ‘*Bases para el entendimiento de la problemática del tránsito y la seguridad vial*’ (Bertotti, 2018), en donde se propone que la *Seguridad Vial* es ‘la disciplina que estudia y aplica las acciones y mecanismos tendientes a garantizar el buen funcionamiento de la circulación en la vía pública, previniendo los accidentes de tránsito’.

Un resultado inmediato de esta propuesta es que el punto de equilibrio de un sistema de transporte que ‘funciona correctamente’ es aquel en el que los accidentes de tránsito no existen, lo que coloca como

objetivo de sus gestores la *erradicación absoluta de los ET*, una situación deseable, utópica e improbable, dado el contexto social de las dinámicas viales y la confluencia de las actividades humanas (Sánchez-Restrepo H. , 2008), pero absolutamente compatible con el mundo ideal de la Geografía del equilibrio.

Desde esta aproximación, los actores involucrados son los ‘causantes directos’, las víctimas y los testigos, lo que a menudo no son clases mutuamente excluyentes y exonera de responsabilidad a las instancias encargadas de la creación y gestión de las vialidades, los fabricantes de los vehículos, los comercializadores y las agencias de servicio de autos, así como la legislación, reglamentación y normatividad para la expedición de licencias de conducir u operar vehículos, es decir, desconoce a todos los factores legales, culturales, sociales y de movilidad que producen dinámicas y provocan ET a cambio de hallar culpables con relativa facilidad y con pocas oportunidades de cambiar de criterio.

Este exceso de simplificación para la atribución de responsabilidades necesariamente termina por desconocer la compleja conjugación de variables que confluyen en la realización de un ET. No obstante, esta situación se mantiene en la mayoría de los sistemas de gestión vial porque, entre muchas otras cosas, supone una situación conveniente que permite ignorar las fuentes del problema. Al relevar de responsabilidad a los modos de producción y socialización dominantes, también se exime a todos los participantes del mercado de las contradicciones, fallas y negligencias que se derivan de las actividades destinadas al tránsito y las distintas formas de movilidad.

Con la idea de mejorar esta visión, en la segunda mitad del siglo pasado, surgió el *paradigma alternativo*, caracterizado fundamentalmente por cuestionar el desconocimiento, o no reconocimiento explícito, de la amplia variedad de componentes sociales en la generación de riesgos tanto sociales como naturales. A medida que se avanzó económica, computacional y tecnológicamente, comenzaron a emerger ideas de dominio y control de las fuerzas de la naturaleza, en consecuencia, surgieron diversas instituciones con la misión de gestionar los riesgos y distribuir los impactos financieros y lograr el pronto resarcimiento de los inconvenientes derivados de los ET, los cuales comenzaron a ser llamados *siniestros*.

Como su principal objetivo se centró en restaurar la normalidad, se siguieron repitiendo la mayoría de los errores del paradigma tradicional y solo se mudaron los argumentos y las iniciativas hacia teorías con enfoque social. Por supuesto, bajo este paradigma prevaleció la dicotomía sociedad-naturaleza y se mantuvo la idea de una dominación absoluta de las fuerzas y las leyes naturales, lo que produjo acciones sumamente agresivas hacia el medio ambiente, aumentando la diversidad y magnitud de los riesgos, así como sus crecientes consecuencias (Tabasso, 2009).

De este modo, a pesar de reconocerse la relevancia de la participación de instituciones dedicadas específicamente a la atención de estos eventos, la mayoría se crearon para realizar sus funciones de manera independiente. Sin coordinación, los conductores de los vehículos continuaron siendo los únicos involucrados, quienes se encontraban sujetos a un juicio sobre su participación y probable responsabilidad.

En los datos que recoge el INEGI para registrar las defunciones de los *Accidentes de Tránsito en Zonas Urbanas y Suburbanas* (ATUS), registran exclusivamente la edad, sexo y otros datos asociados al conductor, lo que demuestra que, desde su visión institucional, solo los conductores son relevantes para caracterizar al evento; minimizando la existencia de todas las demás variables que podrían explicar las discordancias que generadoras de ET, por lo que la función del Estado sigue siendo básicamente la misma que en la corriente de pensamiento anterior: reestablecer las condiciones previas al accidente y la atención de las víctimas mediante la minimización de los costos directamente asociados (Maibach, 2008).

Como puede observarse, entre todos estos paradigmas no existió una gran transición, ya que ninguno de ellos desarrolló la oportunidad de cambiar la visión sobre la participación de los agentes ni las variables intervinientes en los procesos de ocurrencia, frecuencia, incidencia, letalidad o mortalidad. Asimismo, tampoco se reconocieron los factores del entorno ni del espacio público como probables productores de riesgo, lo que poco a poco se fue consolidando como un ‘sistema de pensamiento a la medida del aparato burocrático nacional’.

Es así como, a pesar de que en los últimos años ha existido un gran avance en la producción, registro y disponibilidad de datos, los pocos recursos destinados al estudio de los ET se siguen aplicando a la descripción y el conteo de eventos y defunciones, por lo que la investigación científica continúa siendo limitada, fomentando que la mayoría de los indicadores reportados sobre ET aún se midan en forma determinista (WHO, 2018), algo recurrente incluso en la estimación de las tasas de mortalidad (Omar B Ahmad, 2001; Silvi, 2003; OPS, 2016), por lo que las estimaciones puntuales —que pertenecen a intervalos de confianza— podrían exhibir errores de medición superiores a los valores estimados (Oberaigner, 2007; WHO, 2014; WHO-MCEE, 2017), resultando en estimaciones infructuosas.

Ahora bien, en este punto es preciso reconocer que el estudio del transporte como campo de conocimiento posee una débil tradición en la producción de teoría propia (Gutiérrez, 2012). Esta situación, combinada con un análisis no demasiado riguroso sobre las dinámicas del transporte y su impacto sobre la sociedad, han provocado la ausencia de sistemas integrales de información y bajo ritmo de creación de conocimiento científico sobre las variables relacionadas con los fenómenos viales, lo que a su vez ha propiciado el poco nivel de soporte teórico para producir evidencia

experimental que permita evaluar el impacto de las iniciativas dirigidas a atender la mortalidad por ET (Roth, 2010).

Esta situación, junto con los modestos avances sobre las estrategias para evitar la pérdida de vidas humanas señalan la crisis secuencial de los paradigmas con que se han estudiado los ET y señalan la necesidad de profundizar la discusión sobre el diseño de políticas basadas en evidencia y la creación de un sistema intersectorial para la integración de datos e información, algo que podría avanzar significativamente mediante iniciativas basadas en modelos científicos que posean las suficientes bondades metodológicas para hacerlo viable.

Desde luego, las presiones sociales sobre los alarmantes niveles de impacto en los sistemas económicos y de salud, señalan la necesidad de revisar estos marcos conceptuales, lo que ha dado paso a la coexistencia del paradigma reflexivo del riesgo, que a diferencia de los paradigmas anteriores, señala la necesidad del pluralismo epistemológico en la construcción de un nuevo conocimiento científico (Flores, 2015), lo que supone una bisagra conceptual que abre las puertas a un pensamiento sistémico de mayor complejidad que logre transformar la actitud reflexiva en una proactiva que enfoque sus esfuerzos en explicar cómo se generan muchas de las amenazas relacionadas con los ET, comprendiendo que estos tienen una dinámica condicionada por la exposición y la vulnerabilidad, por lo que es deseable, y debe ser posible, modificar su frecuencia y severidad, además de gestionar y minimizar su impacto.

Desde luego, diversas disciplinas han sorteado estos desafíos mediante la integración de marcos teóricos externos que han permitido reconceptualizar a los objetos de estudio. En los sistemas de tránsito, los múltiples agentes compiten por un espacio para movilizarse, además, la competición no solo es entre los agentes, sino entre los propios riesgos (Latouche, 2013; Eguchi, 2017), lo que produce nuevas dinámicas que podrían magnificar los efectos y detonar procesos adicionales de riesgo mediante una movilidad cada vez más insatisfecha. Para modelar las múltiples amenazas y realizar estimaciones objetivas, válidas y confiables a lo largo del tiempo, así como para incorporar nuevas métricas que permitan un análisis de mayor complejidad espacial, es necesario un nuevo paradigma que permita incorporar nuevas y múltiples herramientas.

Para impulsar el rigor científico es necesario acotar a los objetos de estudio mediante definiciones que, aunque sean incompletas, coadyuven a operacionalizar los conceptos y a volverlos observables. Por ejemplo, el *tránsito* puede entenderse como ‘la acción de desplazarse o trasladarse de un lugar a otro’ (Mapelli, 1987). Asimismo, el *transporte* es ‘la acción de trasladar una persona o cosa de un lugar a otro’ (Leonardo, 2014), lo que sustenta el concepto de servicio y ayuda a establecer las responsabilidades del ámbito comercial, brindando elementos conceptuales y de lenguaje que permitan

distinguirlo del transporte privado, a pesar de que ambos empleen los mismos medios para pasar ‘de un lado a otro’, es decir, circular. Como puede deducirse, el tránsito fue primero a la transportación y no siempre la implica, sin embargo, en algunos países se utiliza la palabra ‘tráfico’, una denominación incorrecta, ya que posee connotaciones comerciales (Galindo, 2005).

Asimismo, la vía es el espacio dedicado a circular y transportar en sus múltiples formatos. De este modo, dado que la *vía pública* es el hábitat natural del ser humano, al ser ocupada por múltiples usuarios, con intereses, motivos y destinos distintos, vehículos y artefactos diversos, se crean conflictos inevitables que solo pueden ser resueltos a través de la regulación jurídica sobre su uso. Dado que la condición de movilidad se desarrolla en la vía pública, los expertos concuerdan con que se requiere de una denominación más apropiada para la legislación que permita aprehender el concepto y hacerlo útil (Mapelli, 1987; Cervantes Trejo, 2009).

En este sentido, el ordenamiento de los diversos usuarios que coinciden en tiempo y espacio con vehículos de distintas capacidades, necesidades e intenciones también demanda conceptos más precisos. El *Derecho de la Circulación Terrestre* o *Derecho del Tránsito* debería brindar garantías sobre el *derecho de transitar libremente a sus* ciudadanos al mismo tiempo que regula la transportación. Por ejemplo, el artículo 14 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos señala: ‘...entrar, permanecer, transitar y salir del territorio mexicano’, pero hace falta definir las responsabilidades asociadas al tránsito y homologarlo en todos los marcos normativos estatales y municipales relacionados.

Otro concepto que también juega un rol central en la inseguridad vial como caracterización de los desplazamientos y el transporte es la *movilidad*, por lo que es necesario integrar y actualizar diversos conceptos de la Sociología Urbana (Gottdiener, M., & Feagin, J. R., 2015) y de la Geografía Crítica (Ginrac, C., 2013), que básicamente proponen a la desigualdad socio-territorial del transporte como ‘un factor de accidentalidad’, lo que sustenta la tesis básica de la Geografía del Transporte: los modelos de urbanización y de desplazamiento territorial están necesariamente correlacionados con la movilidad, por lo que las siguientes cuatro mediciones dadas por Gutiérrez (2010) suelen ser de sumo valor para ampliar el marco analítico y producir inferencias sobre escenarios futuros:

1. **Movilidad insatisfecha:** viajes realizados sin conseguir satisfacer la necesidad que los motiva (por ejemplo, recibir atención médica). Esto es, son viajes “inútiles”.
2. **Movilidad insatisfactoria:** viajes realizados en condiciones desfavorables.
3. **Movilidad insuficiente:** viajes no realizados, suspendidos, postergados o realizados en menor cantidad a la necesaria.

4. **Movilidad asociada:** viajes realizados para cumplir fines subordinados al principal (por ejemplo, viajes por trámites para acceder a prestaciones, turnos, etc.)

De lo anterior, se desprende la obligación de considerar el *potencial de realización* de estas formas de movilidad en la dinámica de los ET, ya que las brechas de movilidad entre el ámbito rural y urbano continúan expandiéndose y, con ello, los riesgos se irán haciendo más específicos, lo que a su vez motivará nuevas tecnologías de transporte con más categorías vehiculares, más vías y usos del espacio público, que a su vez producirán nuevas conductas, propiciando nuevas formas de exposición, vulnerabilidad y de configuración de los riesgos.

La unión de todo lo anterior demanda la creación de un marco teórico robusto y flexible que permita establecer métodos de medición compatibles con las estimaciones y predicciones de manera ágil y precisa, además de promover que las evaluaciones de todo lo relacionado con el tránsito y la potencial materialización de sus riesgos se realicen en un marco que brinde objetividad, transparencia y estabilidad en las mediciones, permitiendo así la construcción de sistemas con menores márgenes de inseguridad para la circulación y el transporte, así como suficiente soporte jurídico y financiero para gestionar con anticipación y solvencia la ocurrencia de los ET previstos mediante modelación y simulación a priori.

De este modo, cuando se hace referencia a las normas jurídicas que regulan la materia, podría ser más apropiado hablar de los *sistemas integrados de movilidad* en un contexto dado y no solo de espacios de circulación, ya que el uso de conceptos apropiados permite valorar situaciones de vulnerabilidad y proporciona elementos para desarrollar intervenciones puntuales y formular políticas públicas en sectores específicos, tales como transporte, salud, educación, empleo o provisión.

1.3 Inseguridad y procesos latentes

En todas las latitudes, las variables que afectan las dinámicas del tránsito cambian constantemente, por lo tanto, puede resultar infructuoso obtener conclusiones solo a partir de los números brutos o las estadísticas descriptivas de los ET sin emplear estimadores, parámetros, indicadores o variables de contraste, que se basen en constructos que aumenten la capacidad de síntesis informativa o la comprensión de la complejidad subyacente. Por ello y con el fin de entender mejor la importancia de los factores objetivos y subjetivos de las discordancias de tránsito, así como su efecto en la frecuencia y severidad de las lesiones producidas por los ET, puede ser útil considerar los efectos de las dimensiones de latencia: exposición, riesgo, vulnerabilidad y consecuencia en los planos explicativos y argumentativos (Nilsson, 2004).

En general, las variaciones en la intensidad de la frecuencia y la severidad observadas son propiciadas tanto por la inseguridad objetiva, es decir, la observada mediante el conocimiento y registro de la ocurrencia de fenómenos adversos, como por la subjetiva —entendida como la inseguridad percibida independientemente de la experiencia—, ambas fomentadas y reguladas por las diversas conductas de riesgo que modulan la exposición y vulnerabilidad de las personas, así como por los distintos procesos y dispositivos de atención a los ET.

Del mismo modo que en los demás ámbitos sociales y de la salud, los factores asociados con los ET son acotados por la delimitación espacial y temporal debido a la manera en que interactúan con los diversos grupos de población. En el estudio de los ET existe la necesidad de reconocer la magnitud del riesgo mediante la modelación adicional de variables latentes —o constructos—, entendidas como variables que no es posible observar directamente, por lo que es necesario inferirlas a través de un modelo y de otras variables que sí puedan ser medidas directamente, lo que sugiere ampliar los espacios de medición y estimación para permitir el diseño de hipótesis y experimentos de naturaleza estadística que permitan valorar el impacto de las acciones e intervenciones con un enfoque de medición experimental (Christensen, L. B. et al, 2011).

Desde luego, en la literatura científica existen diversas definiciones sobre el constructo *medición*. Al respecto, Campbell (1920) escribió ‘Medición es la asignación de numerales para representar propiedades’, mientras que Dingle (1950) señaló ‘Una medición es cualquier operación precisamente especificada que produce un número’, lo que JCGM¹¹ (2012) extendió a ‘El proceso de obtener experimentalmente uno o más valores de una cantidad que pueden ser razonablemente atribuidos a una cantidad’, por lo que, en ciencias sociales, la definición de Stevens (1946) resulta ampliamente aceptada como punto de partida: ‘es la asignación de numerales a objetos o eventos de acuerdo con reglas’.

A pesar de su diversidad y riqueza, todas estas acepciones son compatibles con la medición de ET y la mayoría de los constructos asociados, por lo que es factible emplearlos abiertamente. De este modo, en el contexto de los ET y para ciertos grupos de personas, la exposición puede estimarse como una función del número de viajes realizados, o también como una función del número de situaciones que pueden resultar en un ET (Oikawa, S., et al, 2016).

¹¹ El Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM, por sus siglas en inglés), es una organización en Sèvres que preparó la ‘Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición’ (GUM, por sus siglas en inglés) y el ‘Vocabulario internacional de metrología -conceptos básicos y generales y términos asociados’ (VIM, por sus siglas en inglés).

A partir de estas primeras aproximaciones, el riesgo podría ser estimado como la probabilidad de estar involucrado en un ET por unidad de exposición, por ejemplo, riesgo por kilómetro recorrido, por usuario de la vía, por interacción, por los elementos de vulnerabilidad asociados al tipo de vehículo y por el perfil de usuario, por exposición, etcétera.

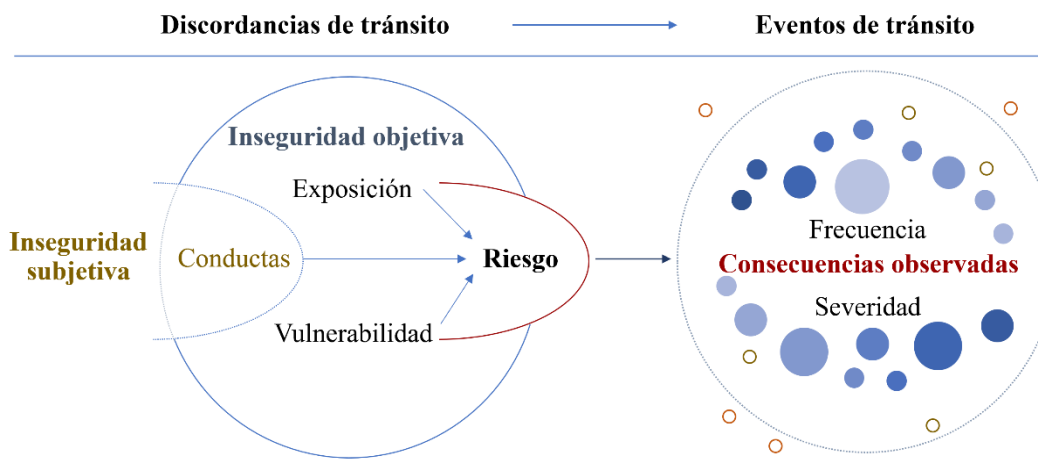
Por lo anterior y con el fin de comprender los datos registrados sobre los ET en México —y las relaciones que representan—, es necesario reconocer las relaciones e interdependencias cuando sea posible, para lo cual se introducen los siguientes conceptos:

1. *Conductas*, que refiere a acciones relacionadas con la elección modal de transporte, de ruta, de velocidad, de condiciones de conducción —bajo los efectos del alcohol, fatigado, etcétera—, son todas las elecciones que se toman ante disyuntivas.
2. *Inseguridad subjetiva*, que es percibida o sentida por los habitantes con base en las sensaciones, la experiencia y la información disponible en las escalas individual, colectivo, social y cultural.
3. *Inseguridad objetiva*, proveniente de los eventos de tránsito ‘registrables’, es decir, el número de ET todas las mediciones y estimaciones relacionadas con el riesgo de participar en un ET y las probables consecuencias de los eventos.

El modelo conceptual de la Figura 1.3 muestra cómo la inseguridad objetiva es el resultante de la exposición y la vulnerabilidad de las personas que, durante su interacción con las discordancias de tránsito, producen sucesos que son observables y medibles. Por su parte, la inseguridad subjetiva se basa en juicios o interpretaciones de la vulnerabilidad que no se realiza en un vacío social, ‘sino que las características personales, relacionales y ecológicas contextualizan el proceso de interpretación de los riesgos potenciales’ (Arnosó et al., 2018), induciendo conductas que disminuyen o magnifican la exposición y la vulnerabilidad misma, lo que a su vez influye en la conformación del riesgo que, al expresarse mediante la producción de DT y las ocurrencias de los ET con muchas de sus características, se vuelven consecuencias observables que no necesariamente son previsibles.

La imagen del flujo también muestra unos círculos en rojo ‘fuera’ del radio de las consecuencias observadas que, debido a la falibilidad de los sistemas, procesos y métodos de registro de ET, se configuran en eventos o consecuencias que no son observadas y que, dependiendo de los mecanismos de validación de registros, pueden o no ser consideradas en los procesos de medición, por lo cual los procesos de frecuencia y severidad son siempre valores con errores de estimación que deben ser considerados en los valores esperados, proyecciones, interpretaciones y conclusiones.

Figura 1.9. Proceso de conformación del riesgo y sus consecuencias observadas



Fuente: Diseño del autor con base en Kröyer, H. (2015).

Ahora bien, diversos estudios han encontrado relaciones no lineales entre los niveles de exposición y el riesgo latente —por ejemplo, Ekman, Jonsson, 2005—. El hecho de que esta relación no sea lineal podría sugerir la existencia de una condición estructural más compleja en la que los riesgos compiten por ocurrir en cada persona y en donde su ‘éxito relativo de ocurrencia’ depende en gran medida del nivel de exposición y del grado de vulnerabilidad de los individuos y los grupos poblacionales a los que pertenecen.

En el análisis de la inseguridad vial, lo anterior se ha relacionado frecuentemente con algunas evidencias que muestran cómo una mayor exposición a los ET da como resultado que los usuarios de la vía desarrollen una mayor conciencia sobre los demás usuarios del espacio público y de las personas en general más allá de la vía. Estas consideraciones han producido diversos argumentos sobre cómo la exposición influye en la inseguridad subjetiva (Jonsson, T., 2013), lo que a su vez podría resultar en un cambio de conducta motivada (Brüde y Larsson, 1993; Ekman, 1996).

Bajo la lógica anterior, también la exposición podría influir en el comportamiento y la inseguridad subjetiva, ámbitos que a menudo resultan influenciados por la exposición, lo cual a su vez impacta en el comportamiento (Wilde, 1982); en este sentido, se propone que es probable un efecto adicional derivado de la combinación de inseguridad subjetiva, la dificultad de las actividades destinadas al tránsito y la habilidad para transportarse, especialmente en los conductores urbanos (Fuller, 2005).

Bajo estos argumentos, un resultado intuitivo consiste en identificar cómo la inseguridad objetiva —tanto el riesgo, como las consecuencias y la exposición— puede influir en la inseguridad subjetiva y que, aunque la relación no sea perfecta, resulta significativa. Además, existen ciertas evidencias sobre cómo la inseguridad subjetiva modifica el comportamiento de los usuarios de la vía y cómo las

conductas motivadas modifican el riesgo de que ocurra un ET, por ejemplo, al conducir bajo la influencia del alcohol o las drogas (Gjerde et al., 2011), con fatiga (Komada et al., 2013) o el camino (Mannering, F.L., 2014).

Por supuesto, si las conductas pueden influir en el riesgo, su modificación o adaptación también pueden influir en las consecuencias, tanto en la frecuencia como en la severidad. El ejemplo más directo en materia de tránsito podría ser la elección de la velocidad, la cual influye en la intensidad de la colisión (Rosén, 2010), algo que se encuentra fuertemente relacionado con la probabilidad de muerte (Rosén et al., 2013). A esta relación circular entre la **inseguridad objetiva→la inseguridad subjetiva→la conducta→la inseguridad objetiva** en la que un cambio en la inseguridad objetiva puede causar cambios de conducta que a su vez puede afectar la inseguridad objetiva, es un fenómeno denominado *adaptación conductual* o *compensación de riesgos* (Ouellet, J. V., 2011).

1.3.1 Latencia

Los investigadores, administradores y diseñadores de políticas públicas están constantemente preocupados por el riesgo de que ocurran ciertos eventos, sobre todo por su probable severidad. Se puede afirmar que, en el centro de los intereses de los especialistas, los análisis sobre el riesgo de ocurrencia de un ‘evento adverso’ tienen varios elementos comunes: 1) exposición al riesgo, 2) el riesgo, entendido como posibilidad de que ocurra el evento, y 3) la severidad de la ocurrencia del evento (Zeng, Q., Huang, et al, 2016).

También existe consenso en que la mayoría de los fenómenos, principalmente los sociales, se ven afectados por variables que no se observan directamente, de hecho, la mayoría de los constructos que se emplean para definir conceptos complejos son en sí mismos inobservables directamente, como, por ejemplo, la calidad de vida, la satisfacción del usuario, la habilidad al volante, el nivel de inseguridad de la vía, la vulnerabilidad de las personas o la fiabilidad de los sistemas (Luping, 2012).

En diversos ámbitos, las variables que no son directamente observables son conocidas como latentes y, desafortunadamente, a menudo son tratadas de la misma manera que aquellas que son observadas directamente, como el sexo de los involucrados, el tamaño de población o el número de defunciones. Sin embargo, al ser constructos, estas presentan diferencias considerables, tanto en su definición, como en las técnicas que deben ser utilizadas para estudiar sus relaciones o hacer inferencias a partir de ellas (Borsboom, D. et al, 2003).

Las variables latentes son entidades aleatorias que no se observan ni se pueden observar en unidades de medida específicas y, por lo tanto, cualquier estimación está sujeta a un error asociado, tales como la vulnerabilidad o el riesgo. Por este motivo, es necesario dar el tratamiento estadístico apropiado a

las variables latentes que se emplean o diseñan en la investigación social, algo que se considera con baja frecuencia en el análisis geográfico y en los fenómenos del sector salud, especialmente en el ámbito de la epidemiología.

Desde luego, la relación condicional entre variables observadas y latentes debe establecerse mediante modelos específicos que permitan estimar la distribución de la varianza explicada, es decir, la proporción de la variabilidad explicada por la estructura latente y el correspondiente complemento debido al error de medición (Wansbeek, T., & Meijer, E., 2001). Ante esta situación, debe quedar claro que la elección de un modelo adecuado se basa en el carácter teórico de la variable no observada y las consideraciones empíricas que impactan en la posibilidad de medir a las variables observadas directamente.

La discusión sobre la ausencia del uso de variables latentes en los eventos de tránsito es prácticamente inexistente, una probable explicación es que aún no se comprende el potencial de la utilización de un grupo de variables o indicadores que puedan ser observados directamente y que sean de interés por estar asociados teóricamente con variables latentes de interés. Mediante este sencillo puente teórico, es posible desarrollar modelos estocásticos que permitan realizar estimaciones de valores puntuales, intervalos de confianza para las realizaciones aleatorias y distintas medidas de probabilidad —con los debidos errores de medición—, las cuales permiten responder a un conjunto de preguntas y establecer indicadores relacionados con ciertos niveles de expresión propios del rasgo latente (Wansbeek, T., & Meijer, E., 2001).

Como es de esperarse, la cardinalidad de los modelos para variables latentes es infinita, las herramientas para extender o adaptar propuestas también son múltiples porque los elementos base son diversos y flexibles, permitiendo un abordaje más apropiado y amplio a planteamientos más complejos, especialmente en lo que refiere a procedimientos de comparación de medias latentes y la validación de modelos que desconocen la necesidad de garantizar la invarianza de medida (Gates, K. M., et al, 2020).

Esta consideración es especialmente relevante para los análisis basados en estructuras factoriales similares a aquellas definidas por Conchado et al., (2015), una anticipación muy relevante para modelar aspectos colectivos, por ejemplo, la velocidad del tráfico en su conjunto, conocido como ‘el entorno de velocidad’ (Du, Y., & Mak, C. M., 2018), la cual también influye en la inseguridad subjetiva (Kaufmann et al., 2005) y la distribución del tiempo de traslado de los diferentes modos de transporte; siendo este último un componente central en la elección modal y de la ruta de los usuarios, lo que identifica una potencial relación entre la exposición y la distribución de la velocidad del tránsito en su conjunto (Wallace, B., 2018).

1.3.2 Exposición y riesgo

Otra relación interesante es la existente entre exposición y riesgo, lo que representa una de las interdependencias más discutidas entre las tres dimensiones productoras de ET y sus consecuencias observadas. La exposición se refiere al inventario de elementos en un área en la que pueden ocurrir eventos peligrosos (Cardona, 1990; UNISDR, 2004, 2009b). Por lo tanto, si la población y los recursos económicos no estuvieran localizados y expuestos a entornos potencialmente peligrosos, no existiría ningún problema de riesgo de desastres.

El peligro se refiere a la posible ocurrencia futura de eventos naturales o inducidos por el hombre que pueden tener efectos adversos sobre elementos vulnerables y expuestos (White, 1973; UNDRO, 1980; Cardona, 1990; UNHHA, 1992; Birkmann, 2006b). Aunque, en ocasiones se ha atribuido al peligro el mismo significado que riesgo, ya se ha explicado que este es un componente del riesgo y no el riesgo en sí. La intensidad o recurrencia de los eventos de peligro se puede determinar en parte por la degradación ambiental y la intervención humana, lo que sugiere el término de *peligros socio-naturales* (Lavell, 1996, 1999a).

De acuerdo con la sección anterior se ha abordado el concepto de riesgo y sus diversas acepciones a lo largo de la historia, este constructo es un objeto de investigación multicausal que converge casi siempre a su definición dentro de un marco de observación, medición y, algunas veces, evaluación. No obstante, el estudio de su ocurrencia en valores extremos es una extensión reciente con mucho auge que merece abordarse. Desde luego, por su generosa posibilidad de aplicaciones prácticas y su enorme utilidad en el área actuarial, financiera y de negocios, existen ya varios enfoques y metodologías de evaluación tales como *Valor en riesgo*, *Análisis de colas pesadas*, *Teoría de valores extremos* o *Análisis de valores extremos* (EVA, por sus siglas en inglés), *Riesgo de desastre*, y algunas más, todas con métodos y técnicas de aproximación numérica y simulación para diseñar escenarios probables con el fin de generar bandas de comportamiento y evolución.

De especial interés es la teoría EVA, que es ya una rama de la estadística y se ocupa de las desviaciones extremas de la mediana de las distribuciones de probabilidad (Haigh, I. D., & Wahl, T., 2019). Su método consiste en evaluar, a partir de una muestra ordenada de una variable aleatoria, la probabilidad de eventos que son más extremos que cualquier observado previamente. Por su parte, el *riesgo de desastre* se asocia con la posibilidad de efectos adversos en el futuro —principalmente los derivados de la interacción de los procesos sociales y ambientales—, así como de la combinación de los peligros y las vulnerabilidades de los elementos o personas expuestas, una concepto muy potente ya que, como ya se ha mencionado, el evento *amenaza* no es el único impulsor del riesgo, sobre todo, cuando la

severidad están fuertemente condicionados por la vulnerabilidad y la exposición de las personas y los sistemas socio-ecológicos (UNDRO, 1980; Cuny, 1984; Cardona, 1986, 1993, 2011; Davis y Wall, 1992; UNISDR, 2004, 2009b; Birkmann, 2006a, b; van Aalst 2006a).

Ahora bien, por su naturaleza, el riesgo de desastre no es ni puede ser una magnitud fija, sino un flujo dinámico continuo en el que el *desastre* es uno de sus muchos ‘momentos’ (ICSU-LAC, 2010a, b), lo que a menudo se asocia con riesgos no gestionados que se encuentran asociados con problemas estructurales de sesgo y deficiencia en su atención y desarrollo (Westgate y O’Keefe, 1976; Wijkman y Timberlake, 1984). Así, los desastres son la materialización del riesgo no gestionado adecuadamente y pueden valorarse a partir del arquetipo de la amenaza, por lo que la configuración social del impacto del riesgo fundamenta la expectativa de la pérdida y, por tanto, su valuación está condicionada al costo de oportunidad de las consecuencias en una nueva realidad y no en la que está vigente en el momento de la identificación.

De este modo, como es solo en la nueva realidad en donde se materializa el potencial de un futuro incierto y adverso, el escenario y sus consecuencias son indeseables porque provienen de una condición latente que es en sí misma una construcción social negativa de la nueva realidad (Renn, 1992; Adam y Van Loon, 2000; Beck, 2000, 2008), por este motivo, la observación y cuantificación de las consecuencias deberían ser valoradas bajo el impacto del riesgo materializado mediante la probabilidad de ocurrencia del acontecimiento en sus valores límite, y no solo en su tendencia.

Lo anterior tiene sentido porque, por ejemplo, algunas amenazas tienen costos financieros bajos y limitados, pero costos humanos muy altos —pérdida de gran número de vidas y de personas afectadas—; otros, por lo contrario, tienen costos financieros muy altos y potencialmente desconocidos, con costos humanos relativamente limitados. Además, los efectos acumulativos de los pequeños desastres pueden afectar la capacidad de las personas, comunidades, sociedades o sistemas socio-ecológicos para hacer frente a futuros desastres (Alexander, 1993, 2000; Quarantelli, 1998; Birkmann, 2006b); Marulanda et al., 2008b, 2010, 2011; UNISDR, 2009a).

Dado que los mismos efectos pueden interpretarse en niveles catastróficos después de cierto umbral, o bien adquirir un matiz proporcional a la suma de pequeños eventos, la acumulación de *pequeños desastres* hasta un umbral de detonación sistémica o colectiva es en sí mismo un riesgo de desastres, ya que está asociado con diferentes niveles y tipos de efectos adversos desproporcionados o incalculables, por ello, la asignación final de una causa —detonadora o no— no debe limitar la valoración de otros riesgos o tipos de riesgo, ya que, al estar latentes, cada uno de ellos compite por materializarse.

Si bien la literatura y el sentido común intercambian y combinan exposición y vulnerabilidad, esto no es apropiado, ya que son distintos. La *exposición* es un componente determinante para el riesgo, no obstante, es insuficiente para detonarlo: es posible mantenerse expuesto, pero no vulnerable. Sin embargo, para ser vulnerable a un evento extremo, es necesario estar también expuesto. El diseño y adecuación de las vías de circulación, la modulación y regulación del tránsito y la planificación territorial son factores clave en la reducción de riesgos por ET. Además, el espacio público ofrece recursos para el desarrollo humano con un nivel de exposición que integra condiciones peligrosas en forma intrínseca y fluctuante.

La dinámica de la población, las diversas demandas de ubicación y la disminución gradual en la disponibilidad de espacios e infraestructura seguros significan que es casi inevitable que los humanos y el esfuerzo humano desarrollen conductas y realicen acciones potencialmente peligrosas (Lavell, 2003). Cuando la exposición a eventos es imposible de evitar, la planificación y modulación de las conductas, emociones y decisiones pueden acompañarse de otros métodos estructurales para ayudar a mitigar los riesgos que confluyen en los sistemas de tránsito (UNISDR, 2009a; ICSU-LAC, 2010a, b), lo que implica observar y medir las consecuencias asociadas a la familia de riesgos que producen ET en forma desagregada.

En la literatura especializada puede encontrarse un modelo general que postula funciones de desempeño de inseguridad para relacionar el número de eventos con la exposición —lo que se puede emplear para los ET distinguiendo entre diferentes grupos de usuarios de la vía— y otras variables. Estos modelos suelen basarse en la ecuación (Elvik, 2014), donde \mathcal{N}_τ es el número de ET, e_τ es la exposición de diferentes grupos de usuarios de la vía, FA_τ son varias variables que describen el entorno y factores asociados (variables geométricas) y $\beta_{i,\tau}$ y $\beta_{k,\tau}$ son constantes.

$$\mathcal{N}_\tau = \exp(\beta_{0,\tau}) \cdot \prod_{i=1}^{\infty} e_{i,\tau}^{\beta_{i,\tau}} \cdot \exp\left(\sum_{k=1}^{\infty} FA_{k,\tau} \beta_{k,\tau}\right) \quad (1.1)$$

Mediante la ecuación 1.1, estudios anteriores han demostrado que esta relación no es lineal para peatones y ciclistas atropellados por vehículos motorizados (Brüde y Larsson, 1993, Elvik, 2009a, Jonsson, 2005, Leden, 2002), donde el exponente suele estar entre 0,3 y 0,7 para el volumen de peatones y ciclistas y frecuentemente entre 0,4 y 0,8 para el flujo de vehículos motorizados (Elvik, 2009a). Esto sugiere que el número de ET no aumenta proporcionalmente tan rápido como el aumento proporcional del número de peatones y ciclistas.

Entre las explicaciones a este fenómeno se encuentra la *seguridad en números* (*safety numbers*)¹², una hipótesis de que, al ser parte de un gran grupo físico o masa, es menos probable que un individuo sea víctima de un percance, accidente, ataque u otro evento adverso. Algunas teorías relacionadas con este postulado también argumentan —y han tratado de demostrarlo empíricamente— que el comportamiento masivo, al volverse más ‘predecible y conocido’ por otras personas, puede ayudar a reducir los riesgos de ET; en este caso, el efecto de la sensación de seguridad crea una reducción real de peligro, en lugar de simplemente una redistribución sobre un grupo más grande.

En la historia reciente, existen varios reportes en la historia que dan cuenta de este efecto. Por ejemplo, en 1949, R. J. Smeed informó que las tasas de mortalidad por carretera per cápita tendían a ser más bajas en aquellos países con tasas más altas de propiedad de vehículos de motor, lo que más tarde se convirtió en la ‘Ley de Smeed’ (Gupta, A., & Mishra, A. K., 2018).

Por su parte, P. L. Jacobsen (2012) comparó las tasas de caminar y andar en bicicleta, en una variedad de países, con las tasas de colisiones entre automovilistas y ciclistas o caminantes, a través de su estudio encontró una relación inversa que, según la hipótesis, se explicaría mediante el concepto de ‘adaptación conductual’, en el cual los conductores que están expuestos a un mayor número de ciclistas en la carretera comienzan a conducir de manera más segura alrededor de ellos. Lo anterior podría resumirse como en Jacobsen y afirmar que ‘es menos probable que un automovilista choque con una persona que camina o va en bicicleta si más personas caminan o andan en bicicleta’, una expresión de la seguridad en grandes números (Elvik, R., & Goel, R., 2019).

Por otro lado, diversos modelos muestran que el número de ET y, por lo tanto, el riesgo de ET por usuario vulnerable, aumenta con un aumento en el flujo de vehículos motorizados (por ejemplo, Brüde y Larsson, 1993, Elvik, 2009a, Jonsson, 2005). De este modo, el número de ET se puede considerar como un efecto combinado de la exposición de todos los grupos de usuarios de la vía que se ven involucrados. Aunque no es demasiado intuitivo, existe una razón lógica por la que se puede esperar que el número de ET cambie con la exposición. Cada suceso tiene una probabilidad determinada de resultar en un ET; por lo tanto, si hay más peatones o ciclistas presentes, aumenta la probabilidad de que algo salga mal en algún lugar.

¹² La *seguridad en números* es la hipótesis de que, al ser parte de un gran grupo físico o masa, es menos probable que un individuo sea víctima de un percance, accidente, ataque u otro evento malo. Algunas hipótesis relacionadas también argumentan que el comportamiento masivo, al volverse más predecible y ‘conocido’ por otras personas, puede reducir los riesgos de accidentes, como en la seguridad del tráfico; en este caso, el *efecto de seguridad* crea una reducción real de peligro, en lugar de simplemente una redistribución sobre un grupo más grande (Smeed, R., 1949).

Adicional a la explicación previa, muchas de las colisiones requieren la interacción entre dos o más usuarios de la vía y, dado que el número de interacciones está relacionado con el número de usuarios, es decir, con el nivel de exposición; (Elvik et al., 2009), existen argumentos que sugieren que debe existir una relación entre ellos. Desde luego, el que la relación parezca ser no lineal requiere cierta discusión, por lo que la literatura identifica al menos cinco posibles explicaciones para esto:

- a) *Adaptación del comportamiento*: la presencia de más peatones o ciclistas hace que los conductores de automóviles sean más conscientes de ellos; por lo tanto, los conductores de automóviles ajustan su comportamiento, lo que resulta en un entorno de tráfico más seguro para peatones y ciclistas (Brüde y Larsson, 1993, Ekman, 1996, Jacobsen, 2003).
- b) *Proceso de aprendizaje*: Viajar con más frecuencia como peatón o ciclista posiblemente resultaría en que todos y cada uno de los individuos estuvieran expuestos a conflictos, lo que les permitiría aprender de ellos y volverse más hábiles para viajar de manera segura (Elvik, 2014a, 2015, Phillips et al., 2011).
- c) *Calidad de la infraestructura y el mantenimiento*: Es posible que las autoridades hagan esfuerzos adicionales para crear una infraestructura segura si la exposición es alta, esto crearía una relación correlativa, en la que los lugares de alta exposición serían más seguros, lo que podría causar esta relación estadística (p. ej. Brüde y Larsson, 1993, Jonsson, 2013, Schepers, 2012).
- d) *Seguridad en grandes números*: Es posible que la relación se invierta y que ésta no sea una relación causal; por lo cual los peatones y ciclistas eligen viajar en lugares que se perciben como seguros (Bhatia y Wier, 2011).

Por lo tanto, es sensato pensar que las tres dimensiones del riesgo están interrelacionadas —entre otros factores— a través del comportamiento de los usuarios de la vía y la inseguridad subjetiva, además de que la relación bilateral entre el comportamiento y la inseguridad subjetiva también es un vínculo importante para comprender las relaciones entre exposición, riesgo y consecuencia. Sin embargo, a menudo es difícil analizar dichas relaciones, por lo cual estas dimensiones se suelen investigar ‘directamente’ (Jacobsen, 2003). Obviamente, los procesos psicológicos detrás de esas relaciones están más allá del objetivo de este estudio, pero una revisión muy completa se puede encontrar en Fuller (2005), Näätänen y Summala (1974) y Ranney (1994).

Otro aspecto relacionado con frecuencia con el riesgo de que ocurra un ET y con las consecuencias de los eventos es la velocidad media de desplazamiento, para los cuales el modelo de potencia y los

modelos de exponente (Elvik, 2009b, Harkey et al., 2008) demuestran que un aumento o una disminución de la velocidad media de desplazamiento influye en el número de ET, siendo la mayor influencia en los eventos más graves (Elvik, 2009b, Nilsson, 2004), por lo que la velocidad media de viaje está relacionada tanto con la dimensión de riesgo como con la de consecuencia.

En este punto es relevante señalar que ninguno de esos modelos está calibrado para ET en peatones y ciclistas (Elvik, 2009b), por lo que podría ser discutible si este tipo de modelos basados en eventos de vehículos motorizados son una base adecuada para comprender las relaciones en torno a los ET que involucran a peatones y ciclistas, sobre todo porque existen diferencias relevantes en la forma en que esos grupos de usuarios interactúan con los vehículos motorizados.

Al respecto, diversos autores han modelado matemáticamente el impacto en los cambios en la velocidad de viaje en la probabilidad de que ocurra un *ET-Fatal* (Pasanen, 1992). En todos los casos, las conclusiones de estos modelos señalan que la variación de la velocidad también tiene relación con el riesgo de que ocurra un ET (Garber y Gadirau, 1988) y, la mayoría, converge a la idea de que conducir a 65 km/h aumenta la probabilidad de muerte 2.5 veces cuando se compara con una velocidad promedio de 50 km/h, es decir, afecta a las variables de riesgo: frecuencia y severidad.

1.3.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se refiere a la propensión de los elementos expuestos, como los seres humanos, sus medios de subsistencia y activos, a sufrir efectos adversos cuando se ven afectados por eventos de peligro (UNDRO, 1980; Cardona, 1986, 1990, 1993; Liverman, 1990; Maskrey, 1993b; Cannon, 1994, 2006; Blaikie et al., 1996; Weichselgartner, 2001; Bogardi y Birkmann, 2004; UNISDR, 2004, 2009b; Birkmann, 2006b; Janssen y col., 2006; Thywissen, 2006).

La vulnerabilidad está relacionada con la predisposición, susceptibilidades, fragilidades, debilidades, deficiencias o falta de capacidades que favorezcan efectos adversos sobre los elementos expuestos Thywissen (2006) y Manyena (2006). Una primera visión de la vulnerabilidad en el contexto de la gestión del riesgo de desastres se relacionó con la resistencia física de las estructuras de ingeniería (UNDHA, 1992), pero las opiniones más recientes informan sobre la vulnerabilidad a las características de los procesos sociales y ambientales.

La vulnerabilidad es un concepto clave para el riesgo de desastres, el término se emplea en muchos otros contextos, por ejemplo, para referirse a las fragilidades epidemiológicas y psicológicas, la sensibilidad de los ecosistemas o las condiciones, circunstancias y factores que hacen que las personas sean vulnerables a estresantes naturales y económicos (Kasperson et al., 1988; Cutter, 1994; Wisner

et al., 2004; Brklacich y Bohle, 2006; Haines et al., 2006; Villagrán de León, 2006). A pesar de su amplia usabilidad, es común encontrar descripciones generales de ancianos, niños o mujeres como 'vulnerables' mal enfocadas o sin ninguna indicación sobre a qué son vulnerables estos grupos precisamente (Bankoff, 2004; Cardona, 2011).

La vulnerabilidad puede verse como una situación específica, interactuando con un evento de peligro para generar riesgo (Lavell, 2003; Cannon, 2006; Cutter et al., 2008). La vulnerabilidad a la crisis financiera, por ejemplo, no implica vulnerabilidad al cambio climático o amenazas naturales. De manera similar, una población puede ser vulnerable a huracanes, pero no a deslizamientos de tierra o inundaciones. Desde la perspectiva de los ET, las condiciones básicas cambian progresivamente y luego inducen nuevas condiciones de riesgo para las sociedades. Por ejemplo, eventos más frecuentes e intensos pueden introducir factores de riesgo en nuevas áreas, revelando una vulnerabilidad subyacente. De hecho, la vulnerabilidad futura está arraigada en las condiciones actuales de las comunidades que pueden estar expuestas en el futuro (Patt et al., 2005, 2009); es decir, las nuevas amenazas en áreas que antes no estaban sujetas a ellas revelarán, no necesariamente crearán, factores de vulnerabilidad subyacentes (Alwang et al., 2001; Cardona et al., 2003a; Lopez-Calva y Ortiz, 2008; UNISDR, 2009a).

Si bien la vulnerabilidad es, en general, específica de la amenaza, ciertos factores, como la pobreza y la falta de redes sociales y mecanismos de apoyo social, pueden agravar o afectar los niveles de vulnerabilidad independientemente del tipo de amenaza. Este tipo de factores genéricos se diferencian de los factores específicos de la amenaza y asumen una posición diferente en las acciones de intervención y la naturaleza de los procesos de gestión y adaptación de riesgos (ICSU-LAC, 2010a, b). La vulnerabilidad está vinculada también a déficits en la comunicación de riesgos, especialmente a la falta de información adecuada que puede conducir a falsas percepciones de riesgo (Birkmann y Fernando, 2008), que tienen una influencia importante en la motivación y capacidad percibida para adoptar actitudes de riesgo. Además, los procesos de mala adaptación o adaptación insostenible pueden aumentar la vulnerabilidad y los riesgos (Birkmann, 2011a).

A menudo, el concepto de vulnerabilidad de las personas se relaciona con la diversidad de condiciones específicas que modulan la exposición a lesiones en distinta magnitud y refiere a la susceptibilidad de daño físico o emocional (Cunha; Garrafa, 2016). Por tanto, la vulnerabilidad humana posee una dimensión social que señala la fragilidad humana resultante de las diversas caras de la desigualdad, en particular la económica, cultural, educativa y de salud (Corgozinho; Oliveira, 2016). En el estudio sobre la fragilidad humana promovida por situaciones de daño y violencia, como es el caso de los eventos de tránsito, es posible sugerir niveles de análisis de vulnerabilidad, aquí se proponen tres que sintetizan diversos planteamientos (Corgozinho; Oliveira, 2016; Correa, 2011; Kottow, 2011):

1. la fragilidad biológica que permite la enfermedad y el fin de la vida misma,
2. las dinámicas sociales y de transporte como condición inherentemente humana, y
3. la ausencia de condiciones mínimas para la protección de la vida y la dignidad de las personas.

Como recurso antropológico, el análisis de la vulnerabilidad sugiere el desarrollo de argumentos que promuevan nuevos marcos normativos que brinden garantías para la protección de los componentes esenciales de la vida con todos sus atributos (Correa, 2011; Kottow, 2004), lo que debe incluir a la salud física y emocional. Además, el componente financiero es un elemento de decisión crucial en la mayoría de los agentes, por lo que el patrimonio involucrado en un ET es frecuentemente un elemento de decisión que afecta todas las dimensiones de la valoración de la inseguridad y las conductas de riesgo.

Asimismo, en el ámbito de la bioética internacional, la vulnerabilidad cobra fuerza como principio ético a través de la *Declaración Universal sobre Bioética y Derechos Humanos*, que afirma que debe tenerse en cuenta la vulnerabilidad humana como un ‘rasgo indeleble de la condición humana, intrínseco a su irreductible finitud y fragilidad’ (Unesco, 2005). De este modo, con el término ‘vulnerabilidad’ se apunta a la protección debida a los ciudadanos ‘con mayores rasgos de fragilidad en una sociedad, por lo que, en el ámbito de la política pública, especialmente en el sector salud, se emplea con frecuencia el concepto de ‘grupos vulnerables’ como una categoría atribuida a personas o poblaciones que presentan características particulares u ocasionales que los vuelven especialmente sensibles a ciertos fenómenos (Neves, 2006; Schramm et al., 2005).

Ahora bien, en el estudio de las discordancias viales y los ET existe una serie de condiciones estructurales que compiten por el aumento de la fragilidad actual en grupos de personas que transitan en el espacio público. Por ejemplo, el perfil de los conductores de vehículos se ha diversificado de acuerdo con el tipo de vehículo, pero también se ha segmentado por grupos etarios, estratos socioeconómicos y otros factores asociados con la cultura, los arquetipos y los imaginarios sociales. Este fenómeno se observa claramente en la mayoría de los países de Latinoamérica a través del aumento de la tasa de motociclistas jóvenes, hombres y con bajo poder adquisitivo, lo que concurre con el predominio de hombres jóvenes que también se asocian con bajos niveles de escolaridad, dominantes en las estadísticas de motociclistas involucrados en ET fatales (Silberner, J., 2019; Silva, 2013; Da costa, et al 2012).

Por lo expuesto, es necesario reconocer que la vulnerabilidad de los distintos agentes que transitan no solo puede ser distinta, sino que esos mismos agentes a menudo poseen distintas estimaciones sobre la inseguridad objetiva y subjetiva que ellos, y los demás, asumen como sujetos de riesgo, por lo que

sus adaptaciones conductuales pueden ser diametralmente distintas ante fenómenos idénticos, así como sus acciones puntuales y colectivas para intentar compensar los riesgos.

Con el fin de distinguir entre los usuarios y su nivel de exposición y vulnerabilidad es útil realizar una partición en grupos identificables que permitan desarrollar las mediciones y estimaciones sobre los elementos de la partición, lo que puede lograrse mediante el uso de las definiciones establecidas por los entes de registro. Como se ha hecho a lo largo de la investigación y con el fin de dar continuidad y garantizar la replicabilidad de las estimaciones, en este estudio se emplean las categorías dadas por INEGI en el *Instructivo de llenado de registros* (2018), realizando algunas agregaciones en los casos que sea útil o necesario.

Ahora bien, en la literatura existe acuerdo en que la primera línea de vulnerabilidad en la vía son los peatones (Shinar, D., 2012). Por *peatón* se entiende: ‘Toda persona que transita por sus propios medios de locomoción por alguna calle, avenida, boulevard, glorieta, etcétera.’ Además, los ET en los que se involucran peatones son, formalmente, *colisión con peatón o atropellamiento*, descrito como ‘Evento vial donde un vehículo de motor arrolla o golpea a una persona que transita o que se encuentra en alguna vía pública, provocando lesiones leves o fatales.’

En este caso, para determinar que la *Causa determinante o presunta del ET* debe describirse el motivo principal que causó el ET, ‘ya sea por condiciones inseguras o actos irresponsables potencialmente prevenibles, atribuidos a conductores de vehículos, así como a peatones o pasajeros, falla de vehículos, condiciones del camino, circunstancias climatológicas, etcétera.’ (INEGI, 2018). Los autores de estas acciones pueden ser: *Conductor, Pasajero o peatón, Falla del vehículo, Mala condición del camino u Otra*. Entonces se debe clasificar al peatón como causa cuando el ET haya sido por al menos uno de los siguientes motivos:

1. Sin precaución al cruzar
2. Sobre el camino
3. Jugaba
4. Trabajaba o empujaba vehículos sin precaución
5. Estado de ebriedad
6. Bajo efectos de droga

1.4 La sociedad del riesgo

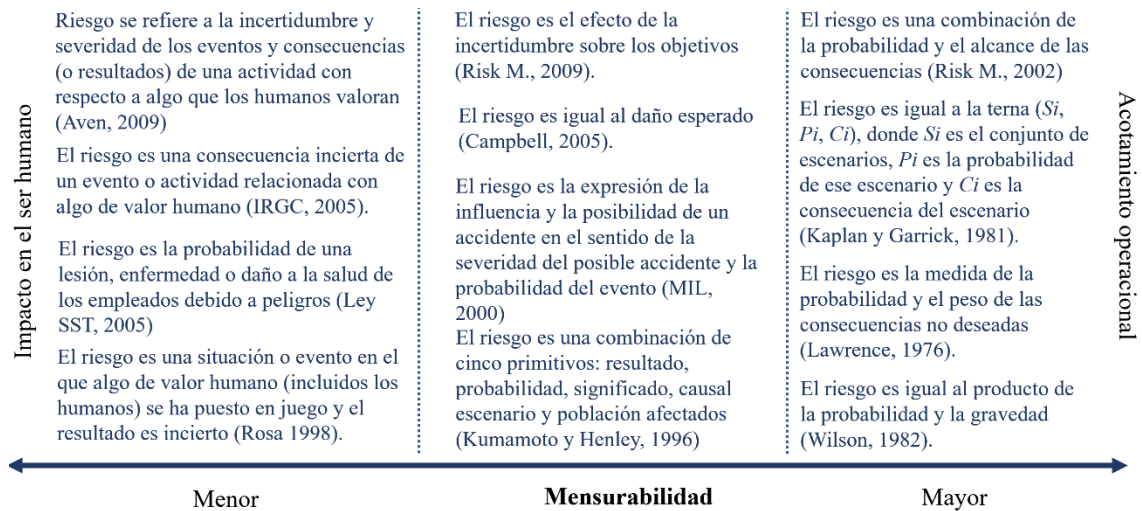
Las amenazas a la estabilidad de la vida humana se encuentran entre los temas que más han preocupado a la sociedad. A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado mecanismos para pronosticar y gestionar la ocurrencia de los fenómenos que le interesan, particularmente de aquellos que le son adversos con la intención de mitigar sus efectos negativos, conocido actualmente en diversos contextos como *evaluación y gestión del riesgo* (Oehmen, 2014). El *paradigma reflexivo del riesgo* analiza el estancamiento del desarrollo científico de la sociedad al confrontar las variables de progreso, control, empleo y recursos naturales, típicas de la primera modernidad, para reconocer su modificación constante debido a la integración y creación de riesgos globales, lo que ha provocado el colapso de las ideas de control, certidumbre y seguridad, para dar paso a la segunda modernidad (Beck, 2006).

En su teoría, Beck (2010) afirma que ‘vivimos en una sociedad del riesgo’ y plantea que en ambas modernidades existe la desigualdad social, solo que, en la sociedad industrial, el eje de gravedad de los conflictos es el reparto de la riqueza, mientras que, en la segunda, el eje es la producción y distribución de los riesgos. Por esta razón, en la segunda modernidad muchos conceptos de las ciencias sociales también quedaron obsoletos (Beck, 2012), ya que las fronteras de la desigualdad y la inseguridad, típicamente ubicados en clases y colectivos sociales homogéneos, fueron modificadas por los procesos de individualización y fragmentación social. De este modo, los aspectos que podían conducirse tales como derechos humanos, educación, bienestar, seguridad y otras responsabilidades asignadas al Estado, se han modificado profundamente (Correa O. & Guillén M., 2011).

A pesar de que el riesgo es un concepto al que se asocian varios significados en múltiples contextos (Adams, 2014), este es un constructo relativamente poco explorado en la mayoría de las disciplinas científicas y apenas en los últimos años se ha desarrollado como objeto de estudio dentro de un marco teórico formal denominado *Teoría del riesgo* (Kaas, 2008). No obstante, en pocos años este marco de trabajo se ha amplificado para hacerse presente en diversas disciplinas y sus distintos usos dan cuenta de la variedad semántica y la convergencia conceptual de enfoques empleados para abordar múltiples fenómenos y contextos mediante herramientas teóricas e instrumentales que dependen, en su mayoría, de la modelación matemática (Bühlmann, 2007).

En la Figura 1.4 se muestran diversas definiciones de riesgo, desde aquellas de tipo operacional hasta las que se enfocan en la adversidad al ser humano, las cuáles han sido empleadas de acuerdo con el marco de interpretación del riesgo para abordar distintos ámbitos.

Figura 1.10. Diversidad semántica y convergencia conceptual del riesgo



Fuente: Diseño del autor con base en Sánchez-Restrepo y Chias (2014).

En todas las definiciones de la Figura 4 se señala al riesgo como el impacto de un evento no determinista en un contexto dado que tiene consecuencias que se pueden medir con mayor o menor dificultad, lo que permite identificar dos propiedades: 1) tiene componentes aleatorios que imprimen incertidumbre en su ocurrencia, y 2) es posible realizar estimaciones sobre diversas variables relacionadas con su frecuencia y severidad.

Ahora bien, dado que el riesgo latente en el espacio geográfico no es homogéneo, es necesario incorporar el concepto de vulnerabilidad en su estimación para lograr discernir cambios en su magnitud debido a diferencias en las poblaciones y contextos que condicionan la ocurrencia de los ET. En este sentido, durante los últimos años se han desarrollado algunas aproximaciones notables, por ejemplo, Wu, Y., Abdel-Aty, M., & Park, J. (2017) desarrollaron una medida del riesgo de colisión trasera basada en las distancias de frenado. Según los datos reunidos por los detectores que monitorean continuamente el tránsito, es posible estimar la distancia entre vehículos que se siguen entre sí en el mismo carril de viaje. Mediante un algoritmo relativamente sencillo, se puede estimar la distancia de frenado como una función del tiempo de reacción del conductor, permitiendo estimar la proporción de vehículos que mantienen una ‘distancia de seguimiento insegura’. Sin embargo, los conductores que mantienen las distancias más cortas no pueden descubrir el alto riesgo que implica hacerlo si nunca surge la necesidad de frenar, fenómeno denominado por Fuller (1991) como *trampa de aprendizaje*.

Por su parte, Papadimitriou, Lassarre, Yannis y Golias (2012) desarrollaron una métrica a nivel micro de la exposición de los peatones al riesgo. Se parte de suponer que los peatones se exponen al riesgo al cruzar la vía y que la posibilidad de cruzarla en un lugar no regulado depende de ‘si hay suficientes espacios en el tránsito o no’ para evaluar el riesgo al cruzar en un lugar determinado. De este modo,

el riesgo es una función del tiempo necesario para cruzar, el volumen del tráfico, la longitud de los vehículos y su velocidad a partir de funciones de utilidad aleatorias para los peatones, lo que les ha permitido simular escenarios realistas y con estimaciones y predicciones sensatas (Papadimitriou et al, 2016).

Asimismo, Paefgen, Staake y Fleisch (2014) señalan que los kilómetros recorridos en vehículos no son una medida homogénea de exposición. Por ejemplo, los kilómetros recorridos en la oscuridad implican un riesgo diferente de los recorridos durante el día y las zonas urbanas implican un riesgo diferente a las zonas rurales. Con base en los datos registrados por una agencia de seguros, estos autores han desarrollado modelos de regresión logística para investigar cómo la probabilidad de involucrarse en un accidente depende de la hora del día, día de la semana, del tipo de carretera, de la velocidad y de la cantidad de kilómetros recorridos mensualmente, un conjunto de planteamientos muy valiosos, desafortunadamente, el estudio no controló las características del conductor, por lo que las conclusiones podrían variar significativamente.

La percepción y el manejo de los riesgos depende del nivel de desarrollo intelectual, económico y sociocultural alcanzado por una población. Situaciones que antes podían ser desfavorables a una sociedad, pueden volverse deseables mediante procesos adecuados de gestión del riesgo, incluso sin modificar el fenómeno. Sin embargo, el mismo proceso de refinamiento en técnicas de administración de riesgos ha provocado la emergencia de nuevos y más diversos riesgos que antes no existían, o no habían sido reconocidos, ya que la evolución del conocimiento y la experiencia han fomentado la generación de ventajas o externalidades positivas derivadas de los riesgos, por lo cual no todos los agentes son adversos y algunos pueden hallar beneficio en su existencia y materialización (Viral Achary, 2011).

Con base en lo anterior, la distinción entre riesgo y catástrofe es vital: el riesgo puede verse como un estado primario de una amenaza que tiene una probabilidad positiva de producir una catástrofe, lo que se identifica a partir del momento en el que ya no es posible evitar los impactos negativos, por lo que se le puede definir espacial, temporal y socialmente (Sánchez-Restrepo H. , 2008). Los riesgos son comunes a todos los seres humanos, pero se clasifican y orientan de acuerdo con la estructura y las jerarquías sociales, por lo que las formas de vida social imputan la responsabilidad de resolverlos a las personas de manera individual. Como consecuencia, cada individuo debe presentarse a sí mismo como ‘culpable de su propia vida y de lo que ocurre en ella: si enferma, si no encuentra trabajo, si no tiene amigos, si triunfa o si fracasa. La libertad condena al sujeto a sí mismo y sus circunstancias’.

Por su parte, algunos críticos señalan que Beck y sus seguidores confundieron el riesgo con la amenaza, ya que ‘la caída de un avión o un terremoto no pueden ser un riesgo para el ciudadano porque

su decisión no determina el evento en ninguna de sus formas y las amenazas no se forman por riesgos individuales' (Luhmann, 2006) debido a que todo riesgo 'se configura como tal siempre y cuando pueda ser evitable por el sujeto' (Miriam, 2017). En el contexto actual, el riesgo aparece como la combinación de los fenómenos sociales y naturales, por lo cual las leyes deben regir para todos, ya que su estimación depende abiertamente del estudio dinámico del binomio espacio-tiempo, lo que implica la comprensión de varios conjuntos de interrelaciones y el uso de herramientas distintas a las empleadas hasta ahora para modelarlo.

Por lo expuesto, el estudio del riesgo señala la profunda necesidad de un nuevo enfoque interdisciplinar debido a que 'la ciencia del riesgo sin la imaginación sociológica del riesgo construido es ciega, [pero] si no está informada sobre las diversas fuentes de las amenazas, es ingenua' (Lawson, 2006), a lo que es posible añadir: y sin datos precisos y detallados sobre sus ocurrencias e impactos, es irremediamente estéril. Argumentos que, al trasladar al estudio de los ET, muestran cómo las herramientas técnicas y conceptuales de la escuela predominante ya han sido rebasadas ampliamente por la realidad, situación que se hace evidente en las contradicciones conceptuales, desde el uso de la palabra 'accidente' para identificar a la ocurrencia de un evento de entre un conjunto de sucesos posibles (Neira J, 2004), hasta la ausencia generalizada de datos sobre los factores asociados al ET en los sistemas de recolección, lo que ha permitido que este fenómeno se haya magnificado en todas las latitudes durante las últimas dos décadas.

1.5 Azar, determinismo y complejidad

Como se ha mostrado, el fenómeno de la 'accidentalidad vial' conlleva situaciones irreparables que detonan eventos de distinta magnitud que afectan las vidas de las personas de manera definitiva, tales como las discapacidades o las defunciones, al mismo tiempo que generan una carga social enorme que, en muchos casos, podrían evitarse mediante acciones con bajo costo de intervención (Cobiac, L., 2009; • Porchia, B. R., 2014).

Hasta ahora, el abordaje cotidiano postula la ocurrencia fortuita y aparentemente desordenada de las diferentes realizaciones de los ET. No obstante, el cambio a un enfoque que incluya a los riesgos como una situación social de producción dinámica de distintos eventos de tránsito como una consecuencia inherente a la movilidad, podría propiciar que los ET pudieran ser entendidos como 'el producto de la falta de coordinación dinámica para la realización de múltiples desplazamientos, en un espacio escaso caracterizado con ansiedad energética y temporal' (Sánchez Restrepo, 2014), carencia atribuida a diversas fuentes de incertidumbre que interactúan simultáneamente de manera no lineal, pero que no se reducen a la trilogía de la vía, el vehículo y el factor humano propuesta por el paradigma clásico,

sino que se conducen por elementos psicológicos, sociales y económicos que impulsan la competencia como mecanismo para afrontar el desafío de la circulación en un espacio escaso.

Lo anterior es especialmente valioso debido a que la existencia de *Puntos de concentración de accidentes de tránsito* (PCET) pone de relieve a otros factores que superan tanto al factor humano como a las vialidades, al mismo tiempo que excluyen por completo al vehículo. De hecho, la existencia de zonas con mayor frecuencia y severidad de siniestros implica que hay elementos sociales no relacionados con la estructura vial que modulan las necesidades de transporte y dirigen la dinámica de las colectividades, provocando el aglutinamiento sistemático de los ET, lo que genera patrones distintos al de la simple adición de los eventos individuales en forma aleatoria.

El reconocimiento de distintos patrones de ‘accidentalidad vial’ y sus tendencias de dispersión, plantea el análisis de los procesos de construcción, planeación y funcionamiento vial, así como de las necesidades de reorientar los mecanismos de circulación de algunos grupos de población y los ejes de competencia por el espacio en puntos específicos del tiempo que son los responsables de producir las *zonas de alto riesgo vial* para la población. Promoviendo el diseño de un nuevo marco de interpretación que involucre a la movilidad de los agentes, más allá del triángulo de la ‘seguridad vial’, desde su registro hasta las responsabilidades legales.

Por todo lo anterior, para dar cuenta de distintos aspectos de los eventos de tránsito, es necesario dar cuenta de las diferentes escalas del fenómeno y desarrollar modelos distintos para cada una de ellas con el fin de reconocer los atributos, variables y parámetros relevantes y poder diseñar políticas e intervenciones adecuadas a nivel individual, en agregados territoriales y para el sistema como un todo integrado, de acuerdo con los siguientes enfoques:

5. *Análisis de la población a nivel de individuo*, llevado a cabo mediante un conjunto de herramientas basadas en las herramientas probabilísticas de la teoría de poblaciones, lo que proveerá de indicadores demográficos que permitan realizar estimaciones estables de largo plazo con base en los registros.
6. *El análisis colectivo de espacios con atributos geográficos*, que coadyuven a definir prioridades de inversión, así como diseñar programas de auditoría e intervención con base en indicadores cuantitativos que coadyuven a fijar metas y realizar comparaciones en el tiempo, el espacio y entre subsistemas.
7. *Las dinámicas evolutivas del sistema como un todo*, para desarrollar políticas públicas basadas en evidencia que puedan ser monitoreadas y valoradas mediante la identificación de

transiciones espaciales y temporales de las variables de ocurrencia, frecuencia, prevalencia, letalidad y severidad de los procesos de accidentalidad vial.

Para comprender la complejidad de los fenómenos viales es necesario definir conceptos operativos que ayuden a crear nuevas herramientas de pensamiento. Por ello, una de las metas centrales de esta investigación es introducir y formalizar conceptos, modelos y métodos para la medición y estimación de variables e indicadores que puedan ser asociados con los ET, incluyendo los accidentes. Integrar constructos de diversas disciplinas permite reconceptualizar a los eventos mediante un marco más enriquecido que muestre su evitabilidad.

Desde una perspectiva histórica, también es posible considerar que los sistemas viales constituyen una respuesta social organizada, las estructuras centralizadas y verticales, que fueron producto de una necesidad concreta y diseñaron la arquitectura física y social del mundo en el siglo XX, consideraron que las funciones básicas de los sistemas viales son: la comunicación, el transporte y el comercio, por lo que todo parecía ser determinista. Muy probablemente, el aumento sostenido de los ET se deba también al modo en que está estructurada la administración pública. Las diferentes dependencias observan solo una parte del fenómeno y limitan su ámbito de competencia a la solución de ‘sus problemas’ por lo que casi siempre se vuelven paliativos y remedios de corto plazo, los cuales resultan sumamente costosos y de bajo alcance.

En este sentido, el sistema de transporte y comunicaciones de la República Mexicana depende de instituciones públicas y privadas, cuyo auge se vio condicionado, entre otras razones, por el desarrollo de las instituciones y de las empresas industriales y de servicios durante el periodo en que se alentó la sustitución de importaciones. Este motor de desarrollo propició que constantemente se requirieran más servicios para atender a un número mayor de usuarios, hasta que llegó el momento en que no fue suficiente sólo el aspecto cuantitativo, sino que se integraron dos necesidades más que devinieron en propiedades imprescindibles de la circulación: la eficiencia y la calidad, propiciando nuevas visiones que comenzaron a admitir que los eventos *se provocan* en vez de asumir que *sucedan*, concluyendo que los individuos y la sociedad generan muchos de los riesgos y que estos tienen una dinámica condicionada a ciertos actos que es posible modificar.

Es así como, al combinar los conceptos provenientes de las ciencias de la complejidad con los modelos de la teoría del riesgo, emerge la oportunidad de construir ecuaciones matemáticas que ayuden a describir, comprender y explicar algunas propiedades de las dinámicas agregadas y su evolución. Por este motivo, uno de los retos fundamentales estriba en reconocer nuevas clases de orden e identificar la dinámica mediante la cual se dan las rupturas de las simetrías en el sistema, así como el reconocimiento de patrones y la existencia de conductas colectivas alejadas del equilibrio.

Sin embargo, para poder reconocer la complejidad de los ET es necesario reconocer qué variables confluyen en su ocurrencia y de qué depende que sea catastrófico o no, es decir, qué factores o magnitudes pueden cambiar drásticamente los resultados del evento. Por ello, estudiar las dinámicas subyacentes a los ET más allá de los aparentes responsables directos, es una acción necesaria para reconocer las acciones más efectivas para minimizar las consecuencias en escalas diferentes a las de los individuos involucrados, ya que, como señala Germinal Cocho (2009):

‘La materia se autoorganiza en escalas y niveles bien distinguibles [...] Si bien la materia es importante, pues sin ella no hay universo, esta desempeña solamente el papel de sustrato de lo verdaderamente trascendente, que son los procesos [...] no podemos imaginarnos la ciencia tal y como la conocemos si para estudiar cualquier cosa tuviéramos que ir a lo infinitamente pequeño de sus componentes’

Es así como la problemática vial del siglo veintiuno se enfrenta a agentes que compiten por un espacio en las múltiples escalas de los sistemas de tránsito, lo que crea una competencia entre los propios riesgos y produce nuevas dinámicas que magnifican los efectos y pueden producir entornos fluctuantes y procesos de producción crónica del riesgo, lo que menudo resulta en una movilidad cada vez más insatisfecha, peligrosa y letal. A lo anterior se añaden problemas no resueltos con relación a la contaminación, las fronteras y los cambios sociales, biológicos y ambientales, todos ellos relacionados con la composición demográfica, la contaminación o la esperanza de vida.

En comunión con las ideas expuestas, el *Informe Mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito* dedica un capítulo a los temas de *Planificación y diseño de vías públicas para mejorar la seguridad y el riesgo de lesiones por deficiencias en la planificación y el diseño*, que sostiene lo siguiente:

‘Todos los sistemas de tránsito son extremadamente complejos y entrañan riesgos para la salud humana. Para lograr un sistema de tránsito menos peligroso se requiere un enfoque sistémico, entendiendo el sistema como un conjunto y como la interacción entre sus elementos, e identificando cuándo existen posibilidades de intervención. En particular, es preciso que se reconozca que el cuerpo humano es sumamente vulnerable a los traumatismos y que los seres humanos cometen errores. Un sistema de tránsito será seguro si se adapta a la vulnerabilidad y falibilidad humanas y las compensa.’ (WHO, 2013)

En este informe también se señala:

‘Los choques automovilísticos son eventos complejos que rara vez tienen una sola causa. Por ejemplo, sería difícil identificar una sola causa de un accidente que se produjo en una vía estrecha, en curva, cuando una helada cayó sobre la carretera, con un conductor sin experiencia, que había estado bebiendo, o ajustaba la radio o hablaba por un teléfono celular. Probablemente el accidente se debió al efecto combinado de varios de estos factores. En el examen de las causas de los AT, un gran número de expertos y estudios identifican tres categorías de factores que contribuyen a los accidentes: humano; medio ambiente y carretera; y vehículo.’

‘Participan del factor humano las medidas adoptadas (conductas) o la propia condición del conductor del automóvil, incluyendo el exceso de velocidad y otras violaciones de tráfico, así como los efectos del alcohol o las drogas, los errores de decisión, y la edad.’

Como ya puede advertirse, el denominado problema de la seguridad vial es multifactorial, multisectorial y nos atañe y amenaza a todos los que alguna vez transitamos, por lo que:

‘En medio ambiente y carreteras los puntos que contribuyen o están asociados a los accidentes incluyen el diseño de la carretera, por ejemplo: medianas, ancho de carril, hombros - banquetas, las curvas, los puntos de acceso, o intersecciones; los peligros en carretera, por ejemplo: los postes, los árboles, o terraplenes adyacentes a la carretera), y las condiciones del medio ambiente, por ejemplo: lluvia, hielo, nieve o niebla.’ (WHO, 2015)

En esto, la geografía está colocándose a la vanguardia mediante modelos computacionales que impulsan la política pública basada en la evidencia. La información geográfica detallada de muchas fuentes de datos permite pasar de una vista macro estática a una vista dinámica de retroalimentación micro-macro que es necesaria para las políticas de gestión y planificación en un mundo no lineal. Ahora bien, como ciencia, se vuelve imprescindible que la geografía se desarrolle deliberadamente como el estudio de fenómenos lejos del equilibrio.

Desde luego, uno de los objetivos estratégicos debe ser que los tres niveles de organización estén interrelacionados y los parámetros mantengan coherencia en y entre las distintas escalas, tal y como sucede en otras disciplinas y sistemas de conocimiento científico. De este modo, para los niveles agregados se propone el uso de modelos compuestos de riesgo a partir del estudio del comportamiento individual y colectivo para generar índices espaciales y temporales que permitan observar la evolución

del sistema, así como reconocer patrones a nivel macro mediante la estimación de sus parámetros de orden y de control.

El uso de estos modelos permitirá crear intervenciones puntuales en los distintos subgrupos poblacionales y generar explicaciones mediante la profundización del conocimiento y contextualización proveniente del análisis cualitativo y el diseño de estrategias para el estudio de casos, lo que sustentaría la comprensión de propiedades sistémicas y la estimación del impacto de distintas intervenciones, todo con la intención de valorar su efectividad y proponer acciones de mejora, así como el desarrollo de un marco teórico e instrumental que establezca las metodologías de estimación de las variables de riesgo que podrían dar cuenta sobre el sistema y las acciones de política pública.

Además, bajo este enfoque resulta plausible que la información proveniente de los individuos y los grupos poblacionales arroje información valiosa que fomente el reconocimiento y modelación de espacios, dinámicas y conductas inapropiadas en la vía pública para generar una cultura de la prevención; algo indispensable para crear espacios que permitan una movilidad sustentable en espacios saludables, así como el desarrollo y promoción de herramientas para que las personas puedan enfrentar escenarios viales conscientes de su realidad y del efecto de sus acciones sobre el entorno y la sociedad, promoviendo así conductas preventivas durante su movilidad cotidiana.

1.6 México: el espacio geográfico en estudio

El desarrollo de una ‘identidad profesional en geografía tiene dos aspectos: el futuro desarrollo del estudio teórico de distribuciones espaciales, y una nueva apreciación del problema clave reconocido por nuestra disciplina’ (Ackerman, 1975). El estudio de las variables relacionadas con los asentamientos humanos, así como su impacto en las dinámicas territoriales y poblacionales, podría constituirse en el núcleo de la Geografía, al menos en el de una geografía entendida como una disciplina científica esencialmente humana.

Para estudiar a las poblaciones humanas, es siempre útil acotar el espacio en el que suceden los fenómenos. En el espacio se construye, transforma, controla, negocia y disputa la tenencia y uso del territorio, como señala Chavez (2016) ‘los procesos sociales, culturales y políticos permiten observar acciones y hechos, sincrónicos y diacrónicos, como relaciones de poder en la transformación espacial [...], disputas territoriales, límites y fronteras normativas y materiales, entre otros, en los ámbitos rural y urbano, nacional e internacional’.

De acuerdo con Jean Tricart (1982), “En su sentido más amplio, el Espacio geográfico (EG) es la epidermis del planeta Tierra”, de lo que se puede deducir que el EG se constituye por dos dimensiones: la de ubicación y la ecológica, permitiendo agrupar a las tres principales orientaciones de la investigación geográfica: la paisajística, la ecológico-ambiental y el análisis espacial, este último cada vez más presente en la sociedad debido al enorme crecimiento en la potencia y capacidad de las nuevas tecnologías. De este modo, podría decirse que el EG es un concepto empleado ‘por la ciencia geográfica para definir al espacio físico organizado por la sociedad, o bien a la organización de la sociedad vista desde una óptica espacial’.

A partir de la definición anterior, es fácil comprender que existen interrelaciones en distintos niveles entre el espacio físico, entendido como el entorno en el que se despliegan los grupos humanos, lo que implica un proceso de construcción social para abstraer algunas de sus propiedades para ser estudiadas posteriormente como concepto geográfico, que en términos políticos y sociológicos, suele denominarse ‘territorio’ sin pérdida de generalidad.

Para acotar de manera más precisa a este concepto, es útil incorporar a la tradición de investigación basada en el análisis espacial, ya que para el estudio de la organización social de los humanos, el constructo EG refiere a la organización social, política, cultural, económica o demográfica de la sociedad que, observada desde un punto de vista geométrico, puede configurarse en forma abstracta mediante un conjunto de nodos que pueden ser acotados espacialmente mediante polígonos —delimitaciones políticas, usos del suelo o zonas de interés específico—, líneas —ríos, caminos naturales, infraestructuras de comunicación y de transporte—, flujos o intercambios de materia, energía o información —personas, mercancías, autos, riesgos—, en donde existen distintas jerarquías y diversos procesos difusivos, siendo necesaria la hiper-simplificación de este espacio para definirlo y modelarlo en escalas útiles e informativas.

Definición 1. El *espacio geográfico en estudio* se conforma por el espacio geométrico $\varepsilon \in \mathbb{R}^3$ que acota un conjunto de nodos, polígonos, líneas, áreas, flujos, jerarquías y procesos de difusión dentro del cual habitan humanos durante un intervalo de tiempo finito $[t, t + \tau]$ con $t, \tau < \infty$ y $\tau \in (0,1)$.

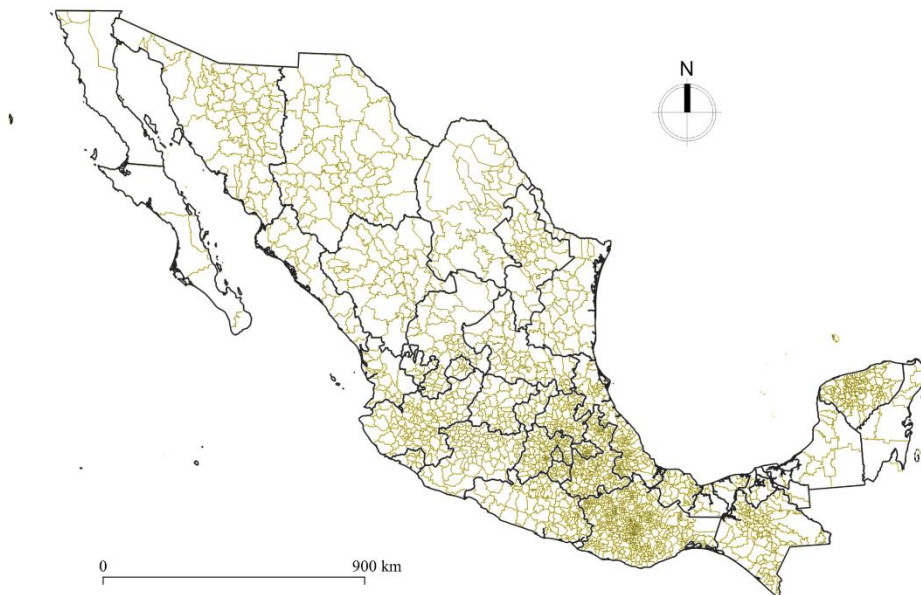
La definición anterior permite observar a los ET en el tiempo y el espacio, lo que a su vez permite estudiar un territorio acotado a la escala humana —con parámetros de latitud, longitud y elevación— para modelar fenómenos sobre el EG —el espacio en estudio— y poder así integrar al análisis los cambios territoriales, geológicos o estructurales que puedan producirse a lo largo del tiempo.

Por definición, todos los territorios se transforman con el tiempo, por lo que la invarianza se convierte en una propiedad de escala. Un claro ejemplo del territorio como espacio de transformación dinámica

es la República Mexicana. Hace un siglo, en 1917, contaba con menos de mil ayuntamientos y un Congreso Constituyente con fuerza insuficiente para que los municipios se desplegaran como instituciones democráticas con vida propia (Galván, L., 2012). Algo que tres años después cambió drásticamente ante la imposibilidad de gestionar el territorio, principalmente, debido a los enormes desafíos propiciados por las distancias físicas y los retos de gran magnitud asociados a su gestión.

Un ejemplo de ‘problemas locales’ de grandes proporciones es la gran epidemia de la gripe española, iniciada en 1918 pero declarada emergencia hasta 1920 por falta de información y comprensión del territorio, un fenómeno que permanece vigente hasta nuestros días en que, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el territorio nacional posee una extensión territorial de 1 964 375 km² —de los cuales 5 127 km² son superficie insular— dividida en 32 entidades federativas que a su vez se conforman por 2 448 municipios y 16 alcaldías localizadas en la Ciudad de México¹³, un total de 2,464, como muestra el Mapa 1.7.

Mapa 1.11. Superficie de la República Mexicana con sus divisiones municipales.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2019).

En la mayoría de los países, el estudio de los ET se basa en dos grandes grupos de datos: 1) Recolección de datos sobre el territorio y sus poblaciones y 2) Registros administrativos del fenómeno. Por supuesto, ambos deben ser debidamente indexados en el territorio y el tiempo, por lo que es necesario

¹³ Dato reportado por INEGI, aunque una investigación realizada por <https://redaccion.nexos.com.mx/?p=10568> señala que en realidad ‘en México actualmente existen 2,466 municipios, considerando las 16 demarcaciones territoriales de la Ciudad de México’.

garantizar que las fuentes empleadas sean de la mejor calidad disponible, lo que brindará garantías sobre la confiabilidad de los resultados de las estimaciones y las inferencias subsecuentes.

Para implementar el modelo y sus diversos indicadores con la información de México, a lo largo de la investigación se utilizan diversas fuentes de datos, las más recurrentes son:

1. Los indicadores demográficos provenientes de la *Conciliación Demográfica de México*¹⁴, 1950-2015 y *Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050*, publicados el 17 de septiembre de 2018, producida por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).
2. Las *Estadísticas Vitales y Defunciones Generales y Fetales (EVDGF) 1998-2018*, en su última fecha de actualización realizada el 30 de septiembre de 2019¹⁵, producida por la Secretaría de Salud (SSA).
3. La *Estadística de Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas (ATUS) 1997-2016*, actualizadas al 27 de abril de 2020, producida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), las cuales contienen los ‘datos de accidentes de tránsito terrestre a nivel nacional, estatal y municipal, ocurridos en zonas no federales’

La consolidación de los registros de mortalidad en México depende directamente de la estadística de defunciones generales, la cual se registra mediante el certificado de defunción puesto en marcha en 1987 por la Secretaría de Salud a nivel nacional y que, a partir de 1989, es el principal formato de captación utilizado por el INEGI a través de distintos mecanismos (DDI, 2018).

Respecto a la cartografía base, en la mayor parte de la investigación se emplea el *Catálogo Nacional de Infraestructura Carretera de la República Mexicana* producido por INEGI con base en la *Red Nacional de Caminos (RNC)*¹⁶, generada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en 2015¹⁷. De acuerdo con los datos más recientes para México, la RNC desarrollada durante más de un siglo

¹⁴ Creadas para proporcionar una población base para el ejercicio de prospectiva, la cual se armoniza con las tendencias de cada una de las componentes demográficas descritas en el documento *Conciliación Demográfica de México 1950-2015*.

¹⁵ Datos basados en Registro administrativo cuya Unidad de Análisis son las defunciones generales registradas en las Oficialías del Registro Civil, Servicio Médico Forense (SEMEOF) y Agencias del Ministerio Público en México.

¹⁶ Basado en el *Conjunto Nacional de Carreteras y Vialidades*, el cual integra las carreteras de los conjuntos vectoriales topográficos escala 1:50 000, ejes de calle de la cartografía censal 2010, así como carreteras nuevas detectadas en el Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte (INIT 2008) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, además de imágenes de satélite SPOT 2008-2012 y GeoEye 2012- 2013.

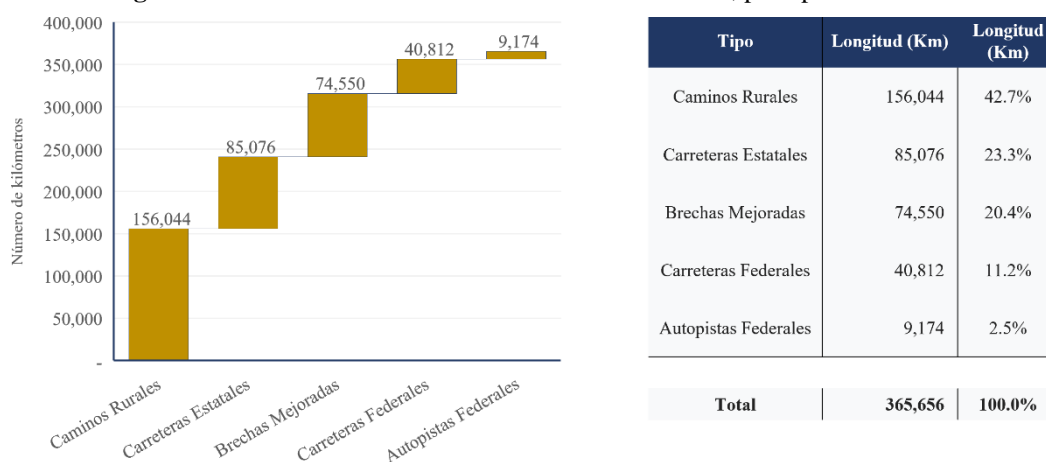
¹⁷ Proporcionar a la ciudadanía y a las Unidades de Estado una red única de vías de transporte terrestre a través de carreteras, vialidades y caminos del País, modelada a gran detalle de acuerdo con su funcionalidad en el mundo real, con las especificaciones técnicas para Sistemas Inteligentes de Transporte, soportada con el estándar internacional ISO 14825:2011. *Intelligent transport systems - Geographic Data Files (GDF) - GDF5.0*

comunica todas las regiones y comunidades del país mediante un conjunto de carreteras conformado por autopistas, carreteras, caminos rurales y brechas que, en total, suma 378 923 km.

Las carreteras en los límites de las zonas urbanas están a cargo del gobierno federal, se denominan *corredores carreteros* y son 15 Corredores¹⁸ —9 longitudinales y 6 transversales— destinados a comunicar a las principales ciudades, fronteras y puertos marítimos del país, en ellos se registra la mayor parte del transporte de pasajeros y carga. Algunos tramos son de libre circulación y en otros es necesario pagar por circular en ellos. Por su parte, las carreteras estatales están a cargo de las entidades federativas, estas agrupan tanto carreteras pavimentadas como revestidas, caminos rurales y brechas.

Las carreteras revestidas son aquellas que no están pavimentadas y dan servicio en cualquier época del año. Los caminos rurales dan acceso a las localidades rurales — aquellas con menos de 2,500 habitantes — y también existen las brechas mejoradas, con la menor calidad de circulación y transporte. En la Figura 1.5 se puede observar la distribución de la red en sus distintas modalidades.

Figura 1.12. Distribución de la *Red Nacional de Caminos*, por tipo de carretera



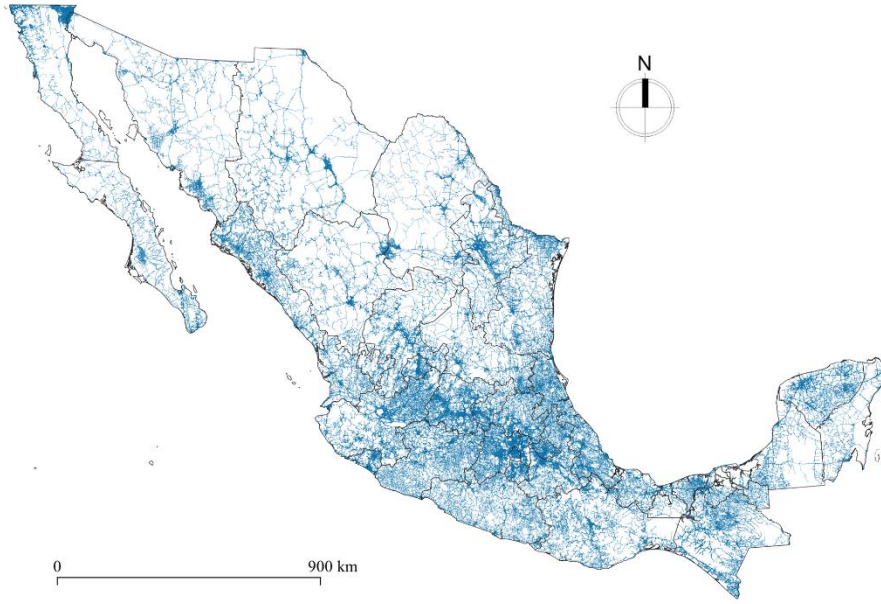
Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2019).

Como puede observarse, los caminos rurales representan el 42.7% del total, seguidos de las carreteras estatales (23.3%) y de las Brechas mejoradas (20.4%), lo que deja 11.2% de Carreteras federales y apenas 2.5% de Autopistas federales.

¹⁸ **Corredores longitudinales:** Transpeninsular de Baja California, Ciudad de México-Nogales, con ramal a Tijuana, Querétaro-Ciudad Juárez, Ciudad de México-Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras, Veracruz-Monterrey, con ramal a Matamoros, Puebla-Oaxaca-Ciudad Hidalgo, Ciudad de México-Puebla-Progreso, Peninsular de Yucatán, Corredor del Pacífico. **Corredores transversales:** Mazatlán-Matamoros, Manzanillo-Tampico, con ramal a Lázaro Cárdenas, Mesa del Centro, Ciudad de México-Tuxpan, Acapulco-Veracruz y Circuito Transístmico.

En el Mapa 1.8 se puede observar la red carretera en todo el país mediante las líneas en color azul, los ejes carreteros marcados en azul más oscuro muestran que la estructura del país es radial y concéntrica, lo que establece lógicas de transporte longitudinal que condicionan las dinámicas de movilidad que configuran riesgos específicos asociados a distintos fenómenos sociales que suelen considerarse exógenos tales como el comercio, la migración o la delincuencia, pero claramente forman parte del ecosistema de tránsito.

Mapa 1.13. Red carretera de la República Mexicana en 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2019).

Definición 2. La *población en estudio* se conforma por un número finito de individuos, denotada por $\Pi_t(\varepsilon)$ que refiere al conjunto de todas las personas vivas — representadas posteriormente por un indicador de Bernoulli, donde 1 denota ‘está vivo’ en la colección $\{I_{1_t}(\varepsilon), I_t(\varepsilon), \dots, I_{\Pi_t}(\varepsilon)\}$ que habita en el espacio $\varepsilon \in \mathbb{R}^3$, lo que permite observarlas en el tiempo t ; las cuales pueden agruparse por edad bajo el vector $\overline{\Pi}_t(\varepsilon) = (\Pi_{0_t}(\varepsilon), \Pi_{1_t}(\varepsilon), \dots, \Pi_{\omega_t}(\varepsilon))$, en donde cada $\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)$ denota la cantidad de personas en edad α , con rango de edades $\alpha \in [0, \omega)$ donde ω es la edad límite de supervivencia, es decir, la edad en la que ya ningún individuo del grupo poblacional bajo estudio sobrevive, por lo que se cumple que

$$\Pi_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \Pi_{\alpha_t}(\varepsilon) = \overline{\Pi}_t(\varepsilon) \cdot \vec{1} \quad (1)$$

con $\vec{1} = (1, 1, \dots, 1)$ y $\vec{1} \cdot \vec{1}^T = \omega$. Asimismo,

$$\Pi_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)$$

$$E[\Pi_t(\varepsilon)] = \pi_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \pi_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (2)$$

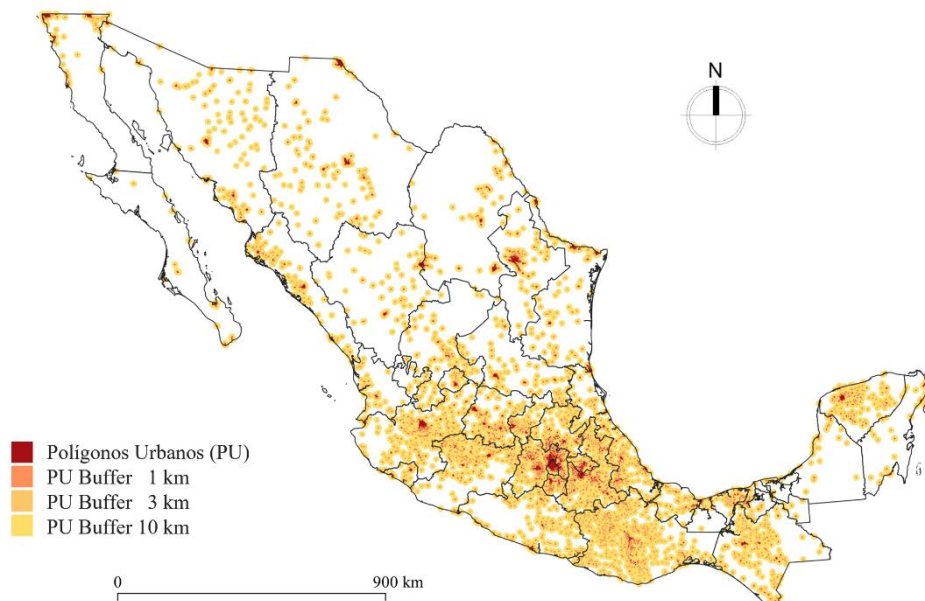
A la suma de todos los elementos de $\overline{\Pi_t(\varepsilon)}$ también se le conoce como *Tamaño de Población* $\Pi_t(\varepsilon)$ y se escribirá simplemente Π_t , cuando el espacio ε referido se encuentre claramente acotado. Además, debe precisarse que, para todo espacio finito, la familia $\{\varepsilon_i\} i = 1,2,3 \dots Z$, para Z también finito, define una partición del espacio total ε , para el cual se cumple lo siguiente

$$\Pi_t(\varepsilon) = \sum_{i=1}^Z \Pi_t(\varepsilon_i) \quad (2)$$

Desde luego, el censo de las localidades tiene múltiples usos, entre los más inmediatos se encuentra el diseño de una tipología de localidades con base en rangos de tamaño de población, lo que a su vez permite delimitar ciudades, conurbaciones y zonas metropolitanas, además de estimar fenómenos de dispersión y densidad poblacional. Con la finalidad de estudiar la estructura urbana del país, INEGI ha desarrollado cartografía geoestadística, por el tamaño del país y su configuración para el acceso a servicios, uno de los principales modelos de estratificación es el tamaño de los asentamiento humanos, a lo cual se ha asociado el atributo de ruralidad.

De acuerdo con el Marco Geoestadístico Nacional, ‘todo lugar ocupado con una o más viviendas, las cuales pueden estar o no habitadas’, o bien ‘sea un lugar reconocido por un nombre dado por la ley o la costumbre’, es una localidad. En México, existen cerca de 200 000 localidades distribuidas como muestra el Mapa 1.9.

Mapa 1.14. Localidades de la República Mexicana con áreas de influencia a 1, 3 y 10 km.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAPO (2018) y de INEGI (2019).

En México se consideran *localidades urbanas* aquellas que tienen una población igual o mayor a 2,500 habitantes, o bien, es cabecera municipal, independientemente del número de habitantes registrado en el último Censo o Censo Nacional de Población y Vivienda (INEGI, 2019). Como en la mayoría de los países, los perfiles urbanos de los asentamientos humanos propician que estos se constituyan en espacios de concentración de riesgos, lo que se extiende ampliamente a los ET debido a las necesidades de movilidad y la competencia por el espacio, por lo que su estudio específico es fundamental para la implementación de las estrategias de atención y disminución de defunciones por ET.

Como en la mayoría de las naciones, en México la población se distribuye de manera asimétrica en distintos EG provocando asentamientos humanos que se van tejiendo con el territorio de acuerdo con las restricciones generadas por los servicios y las posibilidades de prosperidad. Existe coincidencia entre académicos y tomadores de decisiones respecto al veloz crecimiento de las ciudades a nivel nacional y mundial (Almanza, A. S., 2016). De acuerdo con el Sistema Urbano Nacional 2018 (SUN-18) de CONAPO, en México existen 401 ciudades, 74 de ellas son zonas metropolitanas, 132 son conurbaciones y 195 centros urbanos. En estas zonas se concentran 92.6 millones de personas, 74.2% del total nacional (CONAPO, 2018). La distribución se muestra en la Tabla 1.2.

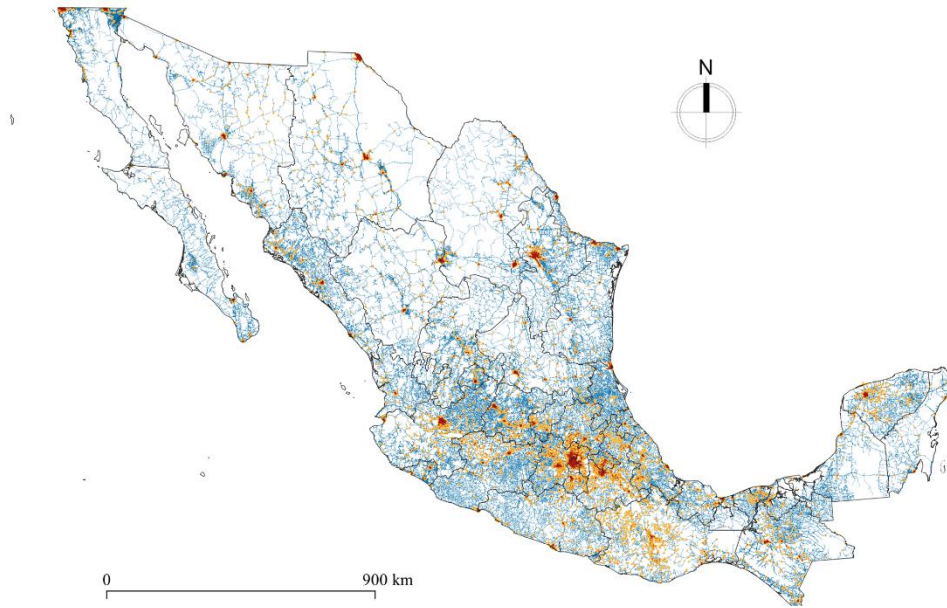
Tabla 1.1. Ciudades de la República Mexicana y su tamaño de población

Tamaño de población	Total		Zonas metropolitanas		Conurbaciones		Centros urbanos	
	Unidades	Población	Unidades	Población	Unidades	Población	Unidades	Población
Sistema Urbano Nacional	401	92 609 144	74	78 290 408	132	7 017 935	195	7 300 800
5 millones o más	2	26 861 070	2	26 861 070				
1 millón a 4 999 999	13	23 807 517	13	23 807 517				
500 mil a 999 999	22	17 103 639	22	17 103 639				
100 mil a 499 999	64	15 080 328	37	10 518 181	14	2 781 828	13	1 780 318
50 mil a 99 999	46	3 033 754			22	1 466 501	24	1 567 253
15 mil a 49 999	254	6 722 834			96	2 769 605	158	3 953 229

Fuente: Tomado de SUN-2018 (CONAPO-SEDATU). Estimaciones con base en CONAPO (2018), Proyecciones de Población a nivel municipal y localidad 2010-2030; e INEGI (2016), Censo de Población y Vivienda 2010 y Encuesta Intercensal 2015.

Los registros sobre población en el territorio de la República Mexicana se pueden sobreponer en la capa de la Red Nacional de Caminos para analizar su nivel de conectividad o identificar localidades aisladas. En el Mapa 1.10 se observa cómo la densidad del desarrollo carretero coincide con los asentamientos humanos y que ambos están distribuidos en el territorio con grandes zonas de concentración que corresponden a las 401 ciudades del SUN, al mismo tiempo que señalan qué espacios del territorio se encuentran desocupadas y cuáles localidades podrían convertirse en ciudades en el mediano y largo plazo.

Mapa 1.15. Sistema Urbano Nacional de México en 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAPO (2018) y de INEGI (2019).

La información anterior es sumamente valiosa, al menos, en tres sentidos:

1. Caracteriza al espacio geográfico como objeto de estudio
2. Permite referir las múltiples estimaciones relacionados con ET
3. A través de sus metadatos es posible relacionarlo con otros conjuntos informativos

Estas tres propiedades son extraordinariamente útiles ya que permiten describir, estimar, inferir y relacionar los resultados de este estudio con otras investigaciones, lo que brinda una enorme potencialidad a los resultados y justifica en gran medida el rigor establecido en cada definición y el uso de los marcos teóricos propuestos como los presentados a lo largo de los siguientes capítulos.

Capítulo 2

Procesos de riesgo por eventos de tránsito

‘Yo sólo juego con mi vida, nunca con mi dinero.’

Stephen Sommers. *La momia* (1999)

En el Capítulo 1 se mostró el estado del arte y el panorama actual de los eventos de tránsito a nivel mundial, así como la evolución de los paradigmas y sus principales enfoques para afrontar los desafíos relacionados con su descripción, modelación, análisis y pronóstico. Desde luego, entre las diversas discusiones sobre su abordaje teórico, se desprenden diversas conclusiones, una de ellas es la crisis del paradigma actual y de la urgente necesidad de actualizar su estudio científico mediante nuevas aproximaciones conceptuales e instrumentales, comenzando con su observación y registro, lo que demanda el desarrollo de un marco teórico y metodológico más robusto, uno que permita realizar nuevas y mejores estimaciones en el tiempo y sobre cualquier espacio geográfico.

Con base en estas premisas y desde un enfoque de investigación orientado a impulsar la objetividad, validez y confiabilidad de los sistemas de medición y análisis de los ET, en este capítulo se desarrollan las bases teóricas y conceptuales que permitirán diseñar indicadores con mejores propiedades métricas mediante un modelo conceptual e instrumental propio y que posee una notación original compatible con los marcos teóricos de los especialistas de diversas disciplinas —salud, matemáticas, estadística, geografía o ingeniería, por mencionar las más frecuentes—. Mediante este desarrollo se pueden utilizar técnicas estocásticas para modelar, analizar y predecir la evolución de los procesos de ocurrencia, frecuencia, incidencia, letalidad y mortalidad por ET, así como generar diversos indicadores espaciales y temporales sobre distintos aspectos de este fenómeno social, brindando herramientas más solventes para evaluar las pérdidas que experimenta la sociedad en los ámbitos productivos y financieros debido a este grave problema de salud pública.

De acuerdo con lo planteado en los objetivos específicos, en las siguientes secciones se establecen los principios científicos y las definiciones conceptuales para describir y monitorear a los ET desde un enfoque interdisciplinar, empleando como núcleo a la Teoría de probabilidades —principalmente para caracterizar variables aleatorias (VA)—, el Cálculo actuarial —para modelar variaciones poblacionales—, los Procesos estocásticos —para modelar familias de VA y sus transiciones en el tiempo y el espacio— y la Teoría del riesgo —orientado a estimar y asignar valores a procesos estocásticos compuestos y su evolución—, lo que supone saltos cualitativos y cuantitativos muy importantes que brindan la posibilidad de mejorar las estimaciones actuales y evaluar las acciones de política mediante un análisis comparativo más formal, permitiendo la formación de hipótesis, la realización de inferencias y la obtención de conclusiones con mayor claridad y profundidad.

Con la intención de evitar posibles ambigüedades, a lo largo de la investigación se emplean definiciones operativas que sustentan las ecuaciones, estimaciones y análisis subsecuentes, desde luego, el marco de interpretación depende de ellas profundamente, por lo que también ayudan a evitar extrapolaciones semánticas o conceptuales que no se sustenten en ellas o que puedan motivar ambigüedades.

2.1 Variables aleatorias y procesos estocásticos

Desde el principio del modelo se asume que, en general, ningún fenómeno social es, o puede ser, determinista, por lo que su estudio teórico implica el estudio de espacios de probabilidad y colecciones de variables aleatorias. No obstante, para evitar saturar al modelo con los axiomas y teoremas propios de un planteamiento con cuerpo matemático, a lo largo del documento solo se presenta un conjunto condensado y sintético de definiciones que son necesarias para lograr que el desarrollo sea una argumentación autocontenida —bajo el supuesto de un mínimo nivel de dominio conceptual e instrumental por parte del lector en los campos del álgebra, el cálculo y la teoría de probabilidades.

Definición 3. Un conjunto Ω es llamado *espacio muestral* si agrupa a todos los posibles resultados de un experimento aleatorio observado.

Aunque Ω se ha definido en un sentido matemático, puede tratarse de cualquier conjunto arbitrario. Así, el espacio muestral que se estudia aquí se constituye por los ET observados en un espacio acotado durante un periodo de tiempo definido.

Definición 4. Una clase o colección no vacía \mathcal{F} de subconjuntos de Ω es una σ -álgebra —se lee ‘sigma álgebra’— si es cerrada bajo las operaciones de tomar complementos y uniones numerables. A los elementos¹⁹ de una σ -álgebra se les llama eventos, sucesos, o más formalmente: conjuntos medibles²⁰, porque se miden dentro del espacio en el que ocurren, por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de un ET.

De este modo, el espacio muestral de los ET configurado por todos los resultados posibles derivados de su ocurrencia señala una dependencia directa entre la observación de la ocurrencia y el marco de interpretación de las consecuencias. Por ello, la σ -álgebra de un espacio observado de ET se conforma por todas las posibles consecuencias del ET asociadas con su nivel de fatalidad —*Fatal, No fatal y Solo daños*, por ejemplo—, pero también por el tipo de evento —impacto, derrapamiento, atropellamiento, caída de pasajero—, lo que permite una gran flexibilidad para la modelación.

¹⁹ Un evento es simple cuando consta, a lo más, de un elemento de Ω . Por lo contrario, se dice que es compuesto cuando consta de dos o más elementos de Ω .

²⁰ A pesar de que el término medible posee un uso ampliamente extendido, algunos autores señalan que el término correcto debería ser *mesurable*.

Definición 5. Una función P definida sobre una σ -álgebra \mathcal{F} que toma valores en el intervalo $[0, 1]$ es una *medida de probabilidad* si para el conjunto universo Ω , $P(\Omega) = 1$ y es σ -aditiva, es decir, si cumple que

$$P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) \quad (2.1)$$

para los elementos A_1, A_2, \dots de \mathcal{F} que cumplen con la condición de ser ajenos a pares, es decir, si $A_i \cap A_j = \emptyset$ para cualquier $i \neq j$. Es así como el número $P(A_k)$ representa una forma de medir la posibilidad de observar la ocurrencia del evento A_k al llevarse a cabo el experimento aleatorio.

Una de las medidas de probabilidad más recurrentes, pero no la única, es la denominada frecuentista, que permite realizar estimaciones centrales insesgadas y puntuales a partir de un conjunto de datos con ciertas características de medición. De este modo, puede definirse la función P sobre los registros de ET como una medida de conteo que, en su expresión más simple, proviene de dividir el número de ET de algún tipo o clase de interés entre el número total registrado (Gut A., 2005).

Definición 6. Un *espacio de probabilidad* es una terna (Ω, \mathcal{F}, P) , en donde Ω es un conjunto arbitrario, \mathcal{F} es una σ -álgebra de subconjuntos de Ω , y P es una medida de probabilidad definida sobre \mathcal{F} .

Es fácil deducir que uno de los grandes desafíos de medición —y por tanto del modelo— es el diseño de espacios de medida que permitan la trazabilidad, comparabilidad, explicación y predicción de los diversos conjuntos de ET y los diversos fenómenos asociados que el conocimiento científico señale, lo que atiende uno de los objetivos particulares de esta investigación.

Definición 7. Una *variable aleatoria* (VA) es una función del espacio muestral en el conjunto de los números reales que satisface cierta condición de mensurabilidad. En particular, se dice que una variable aleatoria es real si cumple con ser una función $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ tal que para cualquier conjunto Boreliano \mathcal{B} se cumple que el conjunto $X^{-1} \mathcal{B}$ es un elemento de \mathcal{F} .

En forma simple: una VA representa la traducción de cada uno de los resultados del espacio muestral en números reales, por lo que es posible considerar que un experimento aleatorio pueda dar como resultado elementos o números, sin duda, la forma más sencilla y directa de realizar mediciones sobre conjuntos de datos. Dado que una VA siempre lleva a los números reales, es posible asociar una función que tome esos números y los transforme en otro número dentro de una intervalo conocido, por ejemplo, un valor entre 0 y 1, lo que permitiría una interpretación ordenada y estándar que permita comparar unos conjuntos con otros y cómo se distribuyen dichos números, esta función es conocida como *Función de distribución* (FD) de la VA y cumple con lo siguiente.

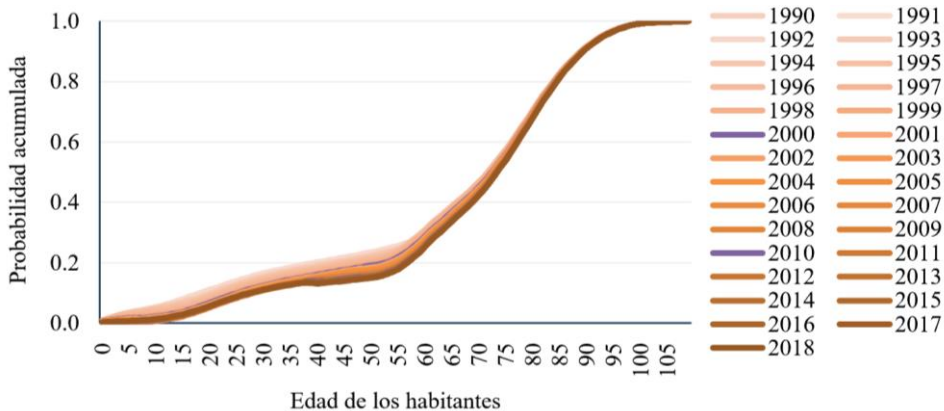
Definición 8. La *función de distribución* (FD) de una VA X es la función $F_X(x): \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$ de tal manera que $F_X(x) = P(X \leq x)$. Toda VA posee siempre una única FD. Las funciones de distribución son sumamente útiles para describir VA porque ayudan a comprender sus mecanismos generadores, especialmente, al utilizar la función de probabilidad FP que, para las VA discretas se encuentra definida como $f_X(x) = P(X = x)$ para todo x en el espacio muestral y cero en otro caso.

Por ejemplo, se ha visto que el tamaño de población de un territorio en estudio $\Pi_t(\varepsilon)$ puede estimarse mediante la agregación de los conjuntos de una partición de su territorio, no obstante, también es posible estudiar su composición demográfica mediante el análisis de la desagregación por la edad de sus habitantes y realizar inferencias e hipótesis sobre su participación en ET, de lo que se deduce:

$$\Pi_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=1}^{\infty} \Pi_t(\varepsilon; \alpha) = \sum_{\alpha=1}^{\omega} \Pi_t(\varepsilon; \alpha) \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 es una suma en el que el valor infinito puede sustituirse por ω , ya que después de esta edad no existen personas vivas, un umbral que es siempre provisto por los registros de INEGI y CONAPO. En la Figura 2.1 se muestra la familia de FD y FP de la serie 2010-2020, en el cual se observa la disminución de las niñas, niños y jóvenes menores 18 años y el aumento de la población en todas las demás edades, un rasgo que será sumamente relevante en las estimaciones ‘per cápita’ o referidas a la población, permitiendo modular las distintas inferencias con base en el tamaño de población.

Figura 2.16. Familia de funciones de distribución de la población por edad, 1990-2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAPO (2018).

En el gráfico también se observa cómo las líneas ‘se desplazan hacia abajo’ conforme avanzan en el tiempo, señalando un fenómeno denominado ‘bono demográfico’, el cual refiere a qué la parte de la población que se encuentra en edades laboral tiene mayor peso en términos relativos, frecuentemente

considerada como una oportunidad para que se presente un crecimiento económico (Saad, 2012), periodo por el que la mayoría de los países han transitado y que en México está a punto de terminar.

A partir de estas definiciones, es fácil extender el análisis al estudio de una secuencia de VA, para lo que solo se requiere agregar un índice que permita mantener el orden cronológico, tal y como muestra la siguiente definición.

Definición 9. Un *proceso estocástico* (PE) es una colección de variables aleatorias $\{X_t: t \in T\}$ parametrizada por un conjunto $T \in [0, \infty)$, llamado *espacio paramétrico*, en donde las variables toman valores en un conjunto S , denominado *espacio de estados*. Cuando T es discreto, se dice que el proceso es discreto y se denota por el conjunto $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$. De este modo, para cada t , X_t es el estado del sistema al tiempo t y representa ‘el valor del proceso en ese punto del tiempo’ (Lawler, G. F., 2006).

En un PE, para cada ω en Ω , X puede considerarse como una función de dos variables tal que

$$X: T \times \Omega \rightarrow S \quad (2.3)$$

Es decir, la pareja (t, ω) tiene asociado un valor $X(t, \omega)$ o también $X_t(\omega)$ para hacer notar que el parámetro t es discreto. De esta manera, para cada posible valor de $t \in T$, existe una variable aleatoria $X_t(\omega)$ resultante del mapeo $\omega \mapsto X_t(\omega)$. Asimismo, para cada ω en Ω fijo la función $\omega \mapsto X_t(\omega)$ corresponde a la realización o trayectoria del proceso, de lo cual se deduce que existe una familia de trayectorias posibles, tantas como el número de distintos de ω en un espacio muestral, lo que permite afirmar que un PE es también en sí mismo una función estocástica.

Por lo descrito anteriormente, si toda VA tiene una función de distribución, entonces para una colección de VA debe existir una colección de funciones de distribución que, en el ámbito multivariado, sea en realidad una función multidimensional.

Definición 10. Una *distribución n -dimensional de un PE* es la función de distribución conjunta de n variables del proceso $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$ tal que

$$F(x_1, x_2, \dots, x_T) = P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_T \leq x_T) \quad (2.4)$$

y

$$F(x_1, x_2, \dots, x_T) = P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_T = x_T) \quad (2.5)$$

Con las definiciones anteriores se pueden realizar diversos análisis, entre otros, obtener los momentos de las VA. Desde luego, la distribución de un PE está caracterizada por el conjunto de todas las distribuciones finito-dimensionales del proceso, aunque puede tener un número infinito de ellos, los dos primeros momentos de la distribución resultan de especial utilidad para realizar diversas

estimaciones y modelar e interpretar diversos fenómenos y magnitudes relacionadas con los ET, los cuales se presentan a continuación.

Definición 11. La *función de medias* de un PE $\{X_t: t \in T\}$ es una función de t que proporciona las esperanzas de las variables X_t tal que $E[X_t] = \mu_t, t \in T$.

Esta función será la más recurrente ya que permite estimar el comportamiento histórico de los datos, analizar tendencias y estimar esperanzas condicionales sobre su probable evolución.

Definición 12. La *función de varianzas* de un PE $\{X_t: t \in T\}$ es una función de t que proporciona las varianzas de las variables X_t tal que $\text{Var}[X_t] = \sigma_t^2, t \in T$

Esta función es particularmente útil para conocer la cantidad de incertidumbre sobre las observaciones de los ET. Con esta estimación es posible realizar predicciones y acompañarlas de las probabilidades de ocurrencia mediante ‘bandas de confianza’, es decir, intervalos de medición en dónde es más probable que sucedan los eventos futuros de interés.

Definición 13. La *función de autocovarianzas* de un PE $\{X_t: t \in T\}$ es una función de t que describe las covarianzas de las variables X_t y X_s , asociadas a dos momentos t y s , tal que

$$\text{Cov}(X_t, X_s) = E[(X_t - \mu_t)(X_s - \mu_s)] = \gamma_{t,s}, \quad t, s \in T \quad (2.6)$$

Definición 14. La *función de autocorrelación* de un PE $\{X_t: t \in T\}$ es una función de t que describe las correlaciones entre las variables X_t y X_s , asociadas a dos momentos t y s , tal que

$$\text{Corr}(X_t, X_s) = \frac{\gamma_{t,s}}{\sigma_t \sigma_s} = \rho_{t,s}, \quad t, s \in T \quad (2.7)$$

Las medidas de tendencia, dispersión y asociación son fundamentales para realizar las estimaciones ya que establecen los parámetros de error en las mediciones y, por tanto, permiten establecer intervalos de confianza estadística para el análisis de variaciones y pronósticos, tanto espaciales como temporales. En este sentido, también es necesario introducir distintos operadores frecuentemente empleados sobre las ST, su uso principal es el de proveer métodos para transformar datos de manera eficiencia y contar con series estacionarias, así como método de eliminación de fuentes de error en las observaciones —tanto sistemático como aleatorio—, siendo frecuente la modelación de las ST después de haber realizado operaciones sobre ellas, lo que a menudo otorga nitidez sobre su comportamiento.

Definición 15. Un PE en tiempo discreto $\{X_n: n = 0, 1, \dots\}$ es *de ensayos independientes* si se constituye por VA independientes que mantienen un orden respecto al parámetro n , formando una sucesión que puede representar ensayos independientes de un mismo experimento aleatorio.

Una propiedad inherente a estos PE es que su resultado u observación es independiente del momento en el que se le registra y, por tanto, de cualquier otra observación pasada o futura del mismo proceso generador.

Existen fenómenos que presentan ciertos patrones de estabilidad dinámica en los que el valor previo inmediato ofrece un componente informativo suficiente para predecir el estado del sistema en el futuro, como es el caso del tamaño y crecimiento de la población. También existen PE en los que la inestabilidad es un componente inherente en su evolución y por tanto el pasado remoto es irrelevante para predecir su futuro, por lo que solo resulta útil conocer su presente para predecir su futuro. Para ambos casos, su modelación mediante procesos de Markov suele ser adecuada, por lo que a continuación se definen sus propiedades.

Definición 16. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ es un *proceso de Markov* si, para una colección de estados sobre su pasado registrado por x_0, x_1, \dots, x_{n-1} , con valor presente x_n y con valor futuro x_{n+1} , se cumple la igualdad

$$P[X_{n+1} = x_{n+1} | X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n] = P[X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n] \quad (2.8)$$

Este planteamiento señala que, en términos probabilísticos, el evento futuro ($X_{n+1}=x_{n+1}$) solo depende de ($X_n=x_n$), lo que puede interpretarse como ‘todo el pasado que es relevante para el futuro del proceso se expresa y está contenido en su estado presente’. Este modelo es fundamental para los sistemas con conductas altamente deterministas y para el análisis de tendencias con regularidad estadística, ya que basta conocer cualquier punto en el tiempo y la ley subyacente para poder realizar predicciones con alto nivel de confianza.

Definición 17. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ es *estrictamente estacionario* si para $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ y $h \in \mathbb{R}$ y cualquier colección t_1, t_2, \dots, t_n que están en T y $t_{1+h}, t_{2+h}, \dots, t_n + h$ también en T , se cumple que los vectores $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$ y $\{X_{1+h}, X_{2+h}, \dots, X_{T+h}\}$ tienen la misma distribución de probabilidades, es decir

$$P(X_{t_1} \leq x_{t_1}, X_{t_2} \leq x_{t_2}, \dots, X_{t_n} \leq x_{t_n}) = P(X_{t_1+h} \leq x_{t_1}, X_{t_2+h} \leq x_{t_2}, \dots, X_{t_n+h} \leq x_{t_n}) \quad (2.9)$$

A pesar de que esta definición es muy precisa, a menudo es muy difícil verificarla, ya que exige el conocimiento de todas las distribuciones finito-dimensionales del proceso y, frecuentemente, los datos disponibles son muy limitados para realizarlo. Por ello, si se desea detectar estacionariedad, a menudo se emplea una condición más débil que se basa en los dos primeros momentos centrales de la distribución del proceso, lo que va de la mano del siguiente acotamiento.

Definición 18. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ es *débilmente estacionario* si las funciones de media y varianza son estables y la función de covarianza solo depende de la distancia entre los tiempos, es decir:

1. $\mu_t = k, t \in T$ y $k \in \mathbb{R}$
2. $\sigma_t = k, t \in T$ y $k \in \mathbb{R}$
3. $\gamma_{t,s} = \gamma_{t+h,s+h} = \gamma_h$, para cualquier par de momentos $t, s \in T$ y $h \in \mathbb{R}^+$.

La hipótesis de estacionariedad resulta vital en el estudio porque al estudiar las realizaciones del PE dadas por las series de tiempo registradas, la mayoría de las conclusiones, inferencias y proyecciones se realizan sobre el análisis de las variaciones debidas a la falta de estabilidad de las expresiones del fenómeno.

Definición 19. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ tiene *incrementos estacionarios* si para todo $t, s \in T$, con $t < s$ y $h \in \mathbb{R}$, las variables $X_{t+h} - X_{s+h}$ y $X_t - X_s$ poseen la misma función de distribución de probabilidades, lo que implica que la variación en el proceso entre los tiempos s y t solo depende de la longitud h y no de los momentos s y t en los que se registran.

Otro concepto vital para este modelo es el que refiere a aquellos procesos en los que el valor futuro esperado coincide con el valor observado actual, lo que supone que las fluctuaciones en el tiempo ocurren de manera simétrica y equilibrada, lo que se define formalmente a continuación.

Definición 20. Se dice que un PE $\{X_t: t \in T\}$ es una *Martingala* si se cumple la siguiente ecuación

$$E[X_{n+1}|X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n] = x_n \quad (2.10)$$

La igualdad de la ecuación 2.10 puede interpretarse como un ‘juego justo’ en el que, salvo fluctuaciones aleatorias, no se espera que existan cambios en el futuro respecto a lo observado en el presente. Para ampliar la caracterización de los PE que son empleados en esta investigación, a continuación, se presentan dos tipos adicionales de procesos.

Definición 21. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ es un *proceso de Lévy* si sus incrementos son independientes y estacionarios.

Definición 22. Un PE $\{X_t: t \in T\}$ es un *proceso de Gauss* si, para cualquier colección finita de tiempos t_1, t_2, \dots, t_n que están en T , el vector $(X_{t_1}, \dots, X_{t_n})$ posee una distribución multivariada de Gauss, también conocida como ‘normal’.

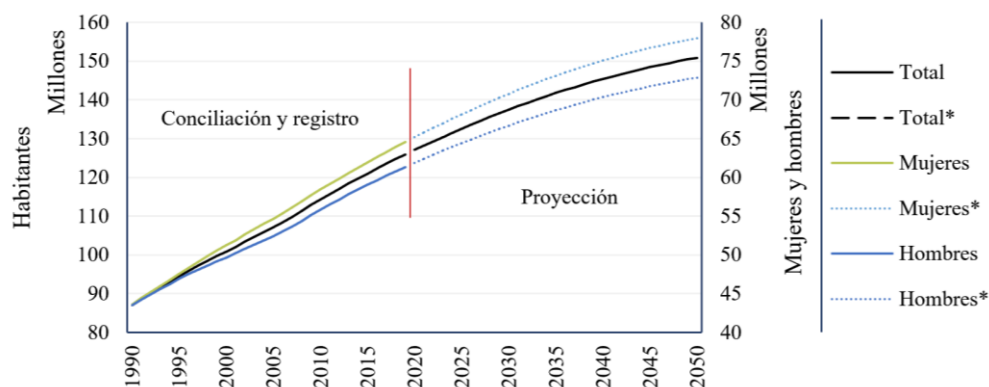
Como se verá a continuación, estudiar a los PE es de interés solo si se pueden analizar sus propiedades a partir de sus realizaciones observadas, es decir, de sus registros ordenados en el tiempo, para lo cual se da la siguiente definición.

Definición 23. Una *serie de tiempo* (ST), denotada por $\{x_1, x_2, \dots, x_T\}$, es una realización de un proceso estocástico discreto $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$, en donde los elementos están ordenados y corresponden a momentos equidistantes en el tiempo. Es decir, para cada una de las variables aleatorias de $\{X_t: t \in T\}$ existe una realización $\{x_t: t \in T\}$ que se materializa en una, y solo una, de las múltiples ocurrencias o estados posibles.

Desde luego, la relación entre PE y las ST es automática porque esta última es una colección de observaciones realizadas de forma secuencial a lo largo del tiempo sobre el fenómeno de interés. Por este motivo, el estudio de la dependencia entre observaciones en la misma serie es de gran interés práctico. En este sentido, la definición de las ST proporciona un conjunto amplio de propiedades matemáticas que permiten realizar operaciones y estimaciones para obtener información útil sobre su comportamiento.

Por ejemplo, las estimaciones de población representados por la serie $\{\Pi_{1990}, \Pi_{1991}, \dots, \Pi_{2020}, \dots, \Pi_{2050}\}$, correspondiente al periodo 1990-2050, refiere a la colección de valores anuales sobre el tamaño de población registrados en México. En la Figura 2.2 se muestran tres líneas con la series de tiempo divididas por sexo dadas por las subpoblaciones Π_t^H y Π_t^M , las cuales crecen constantemente con el tiempo, algo que no sucede en todos los estados o municipios.

Figura 2.17. Evolución del tamaño de población, por sexo, 1990-2050

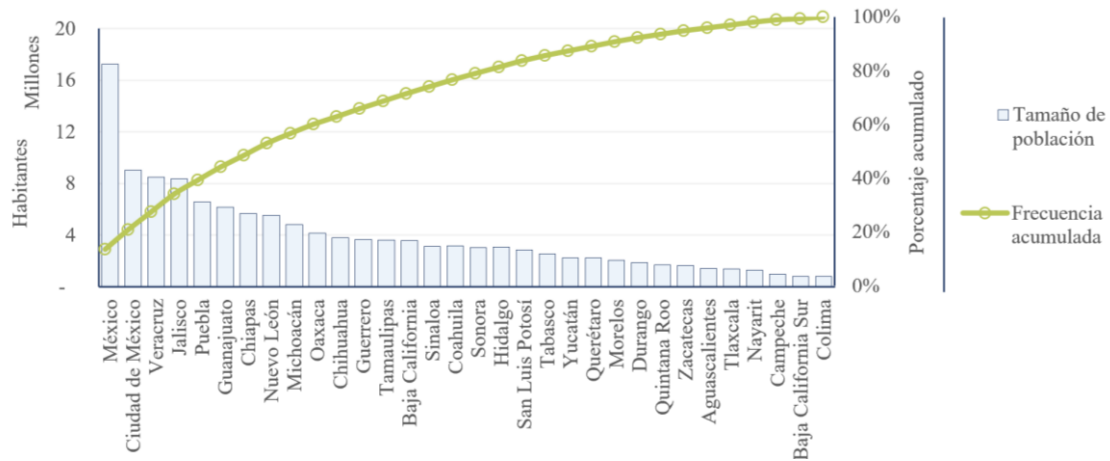


Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAPO (2018).

Asimismo, en la Figura 2.3 se muestran las proyecciones estadísticas efectuadas por CONAPO para el periodo 1990-2050, las cuales señalan que en 2020 se cuenta con una población aproximada de 127

millones de habitantes, los cuales se distribuyen entre las 32 entidades federativas de acuerdo con la misma gráfica, que ordena a las entidades federativas de mayor a menor población.

Figura 2.18. Distribución de la población entre las entidades federativas en 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAPO (2018).

Como puede preverse, el análisis de las variaciones es vital para comprender la dinámica de los fenómenos cuando se analizan ST, por ello, es necesario emplear operaciones sobre ellas que permitan sintetizar los resultados mediante una notación adecuada. Las funciones diseñadas para señalar estas transformaciones suelen denominarse *operadores*, de los que existe una gran variedad, no obstante, aquí solo se definen dos de ellos por su especial utilidad para estudiar las variaciones en los registros de ET.

Definición 24. El *operador retardo* de una función de t en tiempo discreto proporciona el valor de la función en el momento previo $t - 1$, es decir, $BX_t = X_{t-1}$. Además, si a, b son constantes que no dependen del tiempo y X_t y Y_t son funciones del tiempo t , entonces B posee las siguientes propiedades:

1. $Ba = a$
2. $BaX_t = aBX_t$
3. $B(aX_t + bY_t) = aBX_t + bBY_t$
4. $B^k X_t = X_{t-k}$, a B^k , también conocido como operador retardo de orden k .

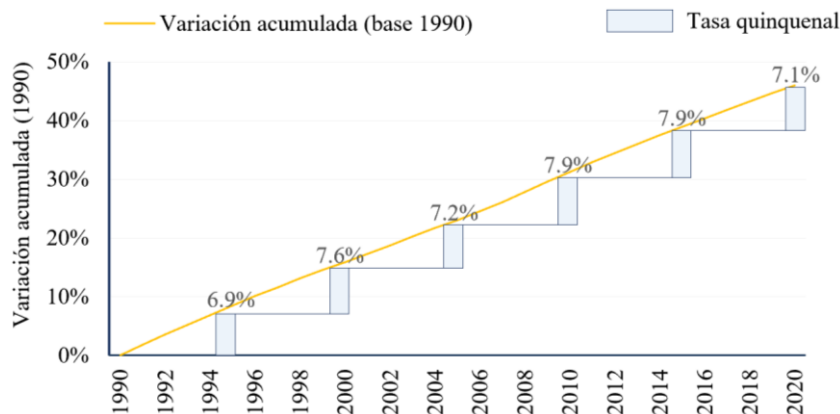
Definición 25. El *operador diferencia* $\nabla(f_t) \in \mathbb{R}$ proporciona el valor existente entre la función f_t en el tiempo t y la misma función en el tiempo $(t - 1)$, es decir, $\nabla X_t = X_t - X_{t-1}$.

En diversos análisis de ST se ocupan transformaciones o se realizan operaciones sobre los datos originales con el fin de obtener estimadores. De las definiciones 18 y 19 se desprenden las siguientes dos propiedades que, definidas instrumentalmente, también son muy útiles para el análisis de las ST asociadas a los ET.

1. $\nabla X_t = X_t - X_{t-1} = (1 - B)X_t$
2. $\nabla^k X_t = \nabla^{k-1}(\nabla X_t)$

Para representar el efecto de estas operaciones en los datos, la Figura 2.4 muestra una gráfica con dos periodos distintos de medición, bajo el mismo método, para mostrar en qué medida ha aumentado la población. Ambas mediciones se realizan respecto al año base 1990, por lo que también ambas coinciden en su estimación al final del periodo: la población mexicana ha aumentado 44.6% en tres décadas, los ‘escalones’ señalan la proporción del cambio cada cinco años y la línea muestra la ‘variación acumulada’ a partir de la interpolación de las mediciones anuales.

Figura 2.19. Tasa anual, quinquenal y acumulada de crecimiento de la población, 1990-2020

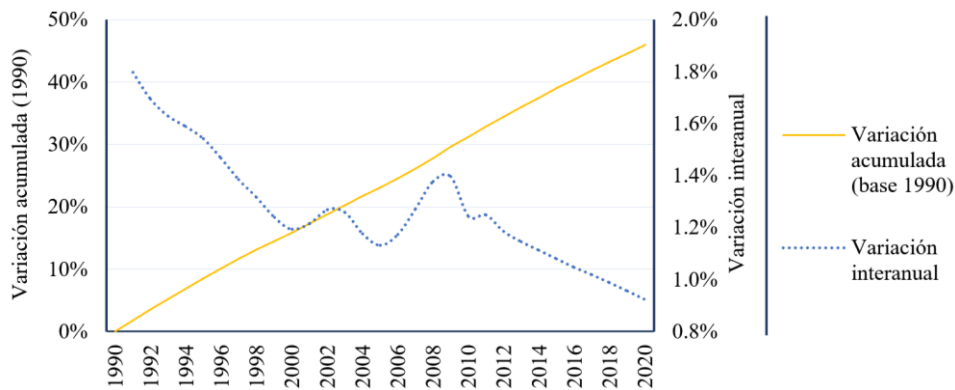


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

También el uso de las diferencias es ampliamente extendido en el análisis de ST, ya que permite realizar análisis variacional y comprender los fenómenos en forma dinámica. Por ejemplo, las variaciones interanuales de la Figura 2.5 ayudan a comprender no solo *cuánto* ha cambiado la población, sino *cómo* lo ha hecho, lo que se puede observar a través de la ST de la población mediante el análisis de otra ST obtenida a través de la ST transformada $\nabla \Pi_{1990}, \nabla \Pi_{1999}, \dots, \nabla \Pi_{2020}$, que está representada por la línea azul punteada.

Esta gráfica muestra que, aunque la población crece continuamente en el territorio, la tasa de crecimiento del número de habitantes no es homogéneo a lo largo del tiempo, sino que oscila entre 0.9% y 1.9% anual —como el repunte observado en el periodo 2008-2011—, observándose un descenso sostenido en la tasa de incremento.

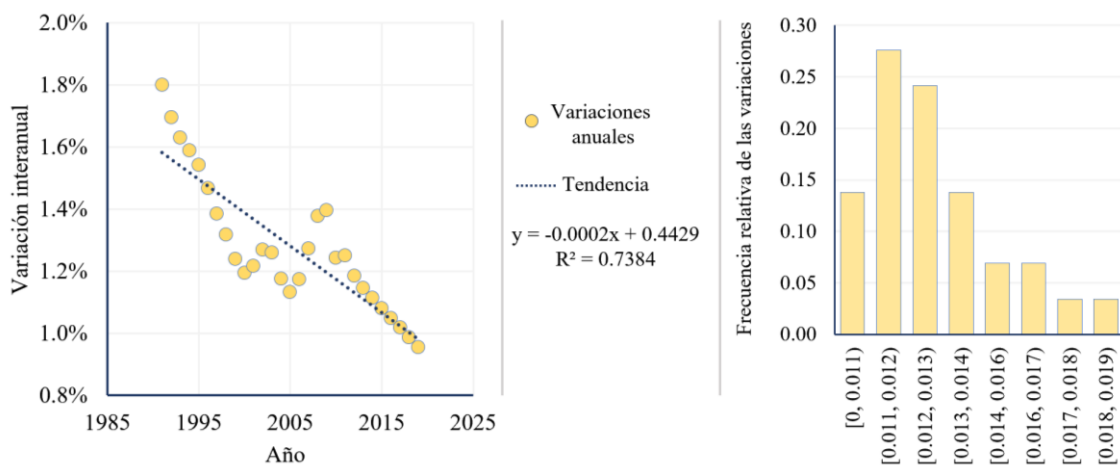
Figura 2.20. Evolución de las tasas de variación anual acumulada e interanual, 1990-2020



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Por su parte, en la Figura 2.6 se observan las variaciones interanuales ordenadas con el tiempo, así como la tendencia a ser cada vez más pequeñas, lo que se confirma en el histograma mediante la generación de una distribución sesgada hacia las frecuencias bajas y en las que las altas variaciones están poco representadas.

Figura 2.21. Tasas de variación interanual con tendencia temporal e histograma, 1990-2020



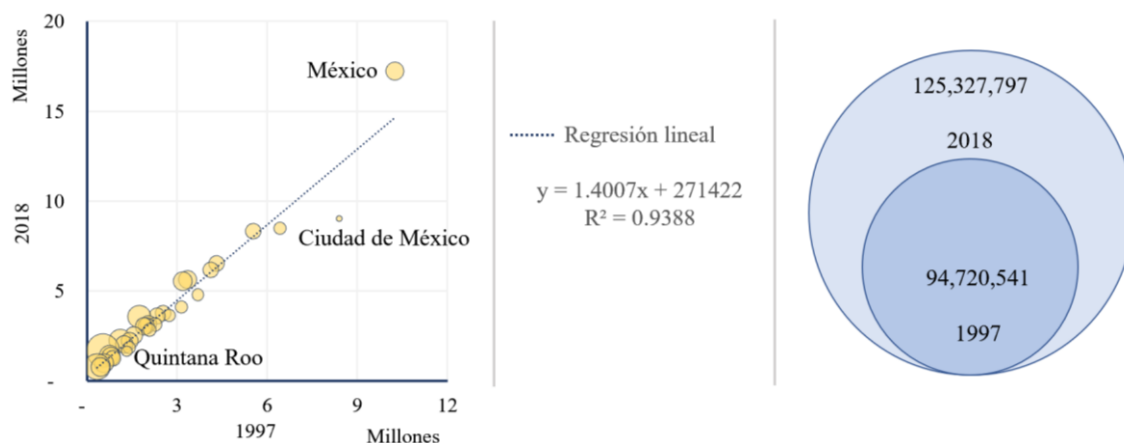
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Para conocer cómo ha cambiado la población en la República Mexicana y en cada una de sus entidades, se emplea el operador diferencia $\nabla^{30}\Pi_{2019} = \Pi_{2019} - \Pi_{1990}$. Como puede observarse en la Figura 2.7, México ha aumentado su población en más de 50% durante las últimas tres décadas; desde entonces y hasta la actualidad, las entidades con mayor población son el Estado de México (17 245 551), la Ciudad de México (9 031 213), Veracruz (8 488 447) y Jalisco (8 325 800).

Desde luego, no en todas los estados la población ha crecido de la misma manera en los últimos 30 años, sin embargo, el cambio a lo largo de tres décadas a escala estatal mantiene regularidad en la

mayoría de las entidades, siendo el Estado de México el de mayor crecimiento absoluto —más de siete millones de habitantes para sumar más de 17 millones, lo que representa 68.4% de aumento en 30 años, mientras que Quintana Roo experimentó un crecimiento de 222.6% al pasar de 522 220 a 1,684,541 habitantes; en contraste, la Ciudad de México registra una tasa de apenas 7.6%, que es la menor de todas, como se observa en la Figura 2.7.

Figura 2.22. Variación en la población por entidad federativa durante el periodo 1990-2018



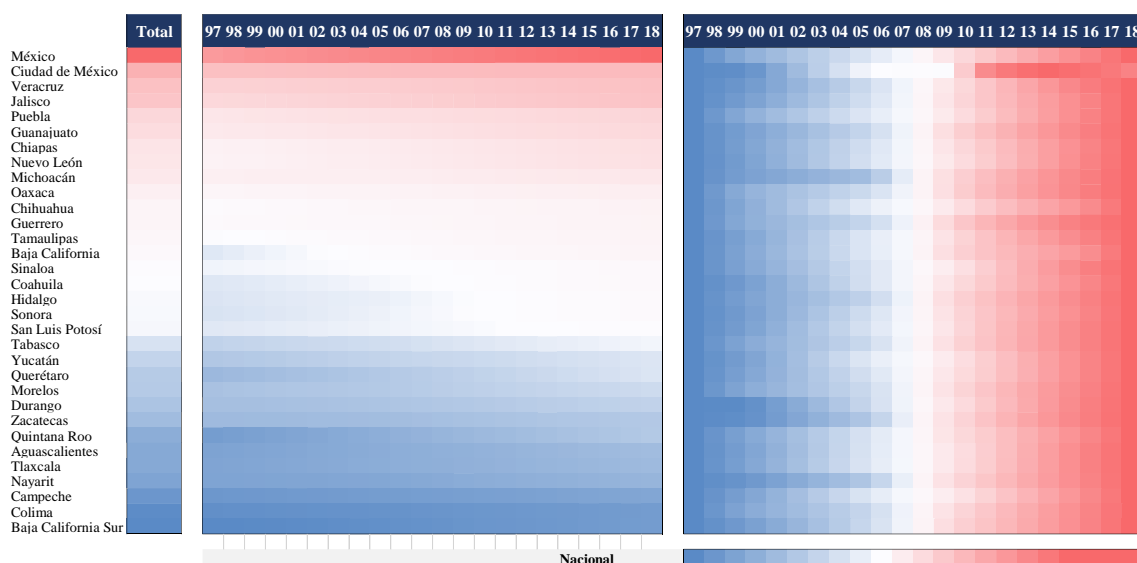
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Para comprender mejor la intensidad del crecimiento de la población en cada entidad, puede ser muy útil describir sus trayectorias a lo largo del tiempo, lo que se encuentra supeditado a la extensión de las ST y de los datos disponibles. Como se ha mencionado, en México, los registros de ET de INEGI son los más completos e íntegros y se encuentran disponibles para el periodo 1997-2050²¹, por este motivo, la mayoría de los análisis longitudinales se realizarán sobre este conjunto temporal. En la Figura 2.8 se muestran dos tipos de análisis en color graduado de las secuencias estatales del tamaño de población en valores absolutos.

En la matriz graduada del lado izquierdo, la graduación del color corresponde al comparativo entre las entidades federativas mediante cortes anuales en forma descendente para ordenarlas de acuerdo con su tamaño de población. De este modo, en la primera fila se encuentra el Estado de México con más de 17 millones de habitantes, seguido de la Ciudad de México y Veracruz, ambos con poco más de 8 millones, mientras que en las últimas posiciones se ubican Campeche, Colima y Baja California Sur con menos de un millón.

²¹ Actualizada a junio de 2020 de acuerdo con la Red Nacional de Metadatos (RNM) implementada por el INEGI, como parte de la Iniciativa de Documentación de Datos (DDI, por sus siglas en inglés) que se puede consultar en <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/506>

Figura 2.23. Variación en la población por entidad federativa, 1997-2018



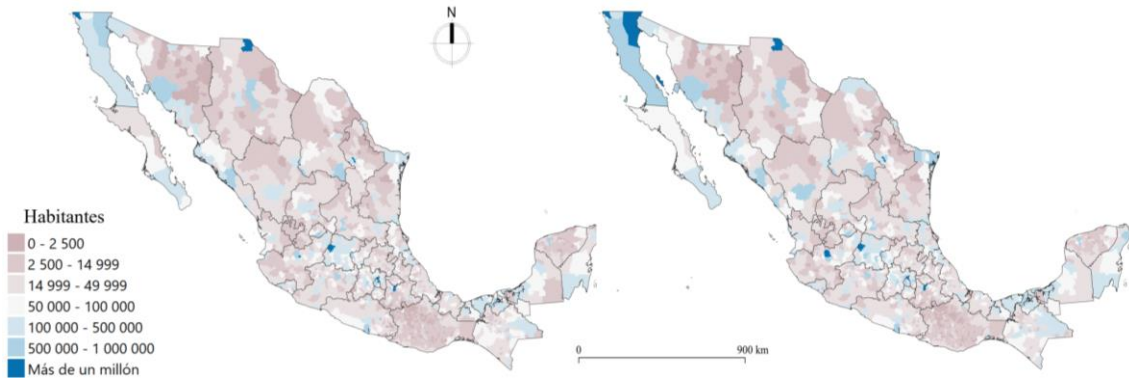
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Por su parte, en la matriz del lado derecho, la graduación del color corresponde a la evolución de la ST para cada entidad, como es de esperarse, en casi todos los casos existe un crecimiento sostenido de la población. Por ejemplo, en Baja California Sur y Quintana Roo, la población ha crecido 84% y 93%, respectivamente, mientras que en Baja California el aumento ha sido de 53%. El caso de la Ciudad de México es inusual porque presenta una ligera baja en su tamaño de población en los últimos años (-0.7%) después del aumento experimentado durante la primera década del milenio.

Desde luego, la forma en que cambia el tamaño de población en un territorio modula la generación de todos sus riesgos (Forfar, D., 2014) y afecta de forma directa las estimaciones de mortalidad, ya que las presiones de movilidad sobre el territorio, el desarrollo de las vialidades, las regulaciones de tránsito y las acciones de urbanización se conjugan con la densidad poblacional para la realización de ET.

A pesar de que la información sintetizada mediante un gráfico es útil cuando se tienen pocas dimensiones y estas son claramente identificables, para conjuntos de variables más amplios o con índice espacial suele ser más útil el uso de cartogramas, ya que estos pueden señalar atributos y patrones claramente identificables para realizar comparaciones desde la primera inspección, como es el caso de los datos a escala municipal mostrados en los Mapas 2.1a y 2.1b.

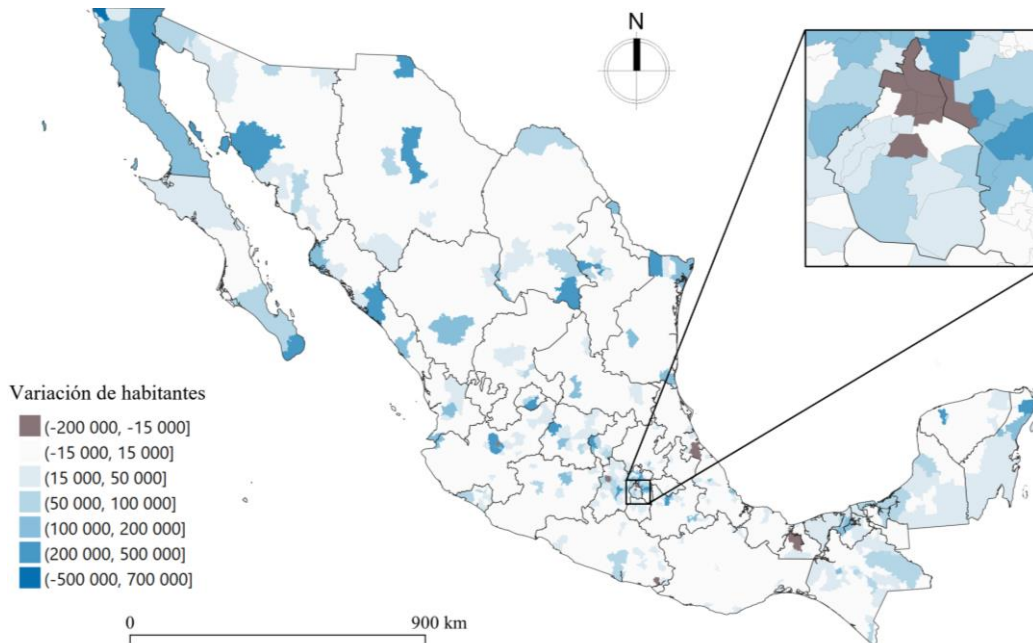
Mapas 2.24.a y 2.1b. Tamaño de población de los municipios en los años 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Para realizar una síntesis de esta información, en el Mapa 2.2 se muestra la diferencia entre las mediciones 1997 y 2018 dadas por $\nabla^{20}\Pi_{2018} = \Pi_{2018} - \Pi_{1997}$, lo que permite deducir que algunos municipios han crecido más intensamente que otros, por ejemplo, Mexicali, León, Ecatepec y Nezahualcóyotl son municipios con grandes niveles de concentración de habitantes que cada vez concentran a un número mayor de personas. Por el contrario, algunos municipios han disminuido su número de habitantes, como es el caso de Papantla y Minatitlán en Veracruz, el de Azoyú en Guerrero, San Felipe del Progreso en el Estado de México o el de las alcaldías Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero ubicadas al norte de la Ciudad de México.

Mapa 2.25. Variación de la población municipal entre 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

A partir de lo expuesto, es fácil notar que la cantidad de información y conocimiento que puede extraerse de los conjuntos de datos debidamente ordenados en el tiempo y en el espacio resulta de enorme relevancia para estudiar los ET, su impacto y la configuración de los distintos escenarios de riesgo, por lo que se constituyen en las herramientas esenciales para presentar los resultados de los análisis posteriores.

2.2 Discordancias y eventos de tránsito

Cuando se requiere inferir distintos aspectos de la ‘realidad’, emergen planteamientos sobre dos cuestiones: 1) la factibilidad de observar todos sus rasgos relevantes y 2) la racionalidad práctica de llevarlo a cabo explícitamente, por lo que a veces es necesario recurrir a técnicas de medición de constructos, variables que ‘realmente están allí’, pero que están ocultas o se manifiestan en formas no evidentes, ya sea por no ser operacionalmente claras o por corresponder a conceptos abstractos, como categorías, estados de comportamiento, mentales o del sistema conocidos como *variables latentes* (Borsboom, D. 2008; Fairley, L. et al, 2014).

Definición 26. Las *variables latentes* (VL) son entidades aleatorias no observadas, que no presentan una unidad de medida específica, sino que son inferidas a través de un modelo matemático a partir de otras variables que se observan y que, por lo tanto, posee errores inherentes de estimación (Borsboom, D., 2008)

El desarrollo de metodologías para estimar variables latentes es incipiente en la producción de conocimiento científico y se vincula con procesos de diseño y validación de nuevos instrumentos de medición. Además, los modelos para variables latentes son diversos y flexibles, por lo que son herramientas útiles para la investigación ya que contribuyen a un abordaje más apropiado y amplio a problemas complejos (Pedrero, V., et al, 2015). El potencial de las variables latentes en investigación en Salud reside en extender los análisis al desarrollo de explicaciones causales de los fenómenos que involucran variables que no son directamente observables, lo que implica un abanico de oportunidades para la investigación sobre ET con un enfoque interdisciplinario.

Como se ha dicho, en el núcleo de esta investigación se encuentra la modelación de los ET. Por ello, antes de presentar las siguientes definiciones, es útil presentar los principios establecidos por la *Society of Actuaries* (SOA) respecto a los modelos de aproximación estadística:

‘Principio 1. Regularidad Estadística. Los fenómenos existen como tales y, si una secuencia de experimentos es realizada bajo las mismas condiciones particulares, la proporción de ocurrencias de un suceso dado se va estabilizando conforme el número de veces que se repite el experimento se va haciendo más grande.

Si un fenómeno muestra regularidad estadística, una estimación de la probabilidad de un suceso asociado con el fenómeno puede ser la proporción de ocurrencias del suceso de interés en una secuencia de ocurrencias suficientemente grande. Sin embargo, este método no excluye la posibilidad de evaluar las probabilidades subjetivamente utilizando otros criterios.

Principio 2. Modelación Estocástica. Un fenómeno que muestra regularidad estadística puede ser descrito a través de un modelo matemático que estime, dentro de cualquier grado de exactitud, la probabilidad de un suceso dado en una secuencia de experimentos suficientemente grande. Un modelo determinista es un modelo estocástico simplificado en el cual la proporción de ocurrencias de un suceso, estimada por el modelo estocástico, es supuesta con probabilidad uno' (Allaben, M. et al, 2008).

De acuerdo con lo anterior, los modelos estocásticos pueden estar basados en resultados obtenidos de observaciones previas o pueden utilizar suposiciones iniciales acerca de las probabilidades de varios conjuntos de resultados, los cuales pueden ser sistemáticamente revisados conforme se obtiene más información sobre los fenómenos.

Estos principios son importantes por al menos dos razones:

1. En el estudio de los ET es frecuente observar sus regularidades estadísticas para comprender las fuentes de variación.
2. En la cotidianidad, las situaciones no pueden ser reproducidas exactamente. Aun así, el modelo idealizado, que sirve como una representación aproximada del fenómeno, puede exhibir la propiedad de regularidad estadística con la intención de estimar las magnitudes y propiedades cualitativas sobre su ocurrencia en el futuro²².

A partir de estos dos principios, se extienden los fundamentos de la mayoría de los modelos estocásticos, lo que permite emplear notación estándar para generar un instrumental propio que ayude a sentar las bases del estudio estocástico de los ET con el fin de realizar análisis más robustos. En este punto es útil destacar que, de acuerdo con el segundo principio de la SOA, para obtener estimaciones asintóticas, es necesario estudiar grupos con números suficientemente grandes y que estos se encuentren sujetos a diversos tipos de fuerzas y dinámicas que produzcan eventos de tránsito. Para atender este requerimiento teórico e instrumental, es deseable que los resultados observables de un ET

²² George Box, uno de los estadísticos más influyentes del siglo XX, escribió: 'en esencia, todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles' (Box, 2013).

se encuentren agrupados mediante alguna taxonomía, la cual puede ser dada por un contexto específico o solo métricamente.

Como puede deducirse, para analizar los ET como un fenómeno que afecta a una población, así como sus probabilidades de ocurrencia, es esencial sistematizar los procesos de observación y medición de la *frecuencia* y la *severidad* de manera objetiva, comenzando por los mecanismos generadores de los eventos, lo que determina las propiedades observables.

Definición 27. Una *discordancia de tránsito* (DT) es una variable latente que produce interrupciones al tránsito en sistemas terrestres debido a uno o más sucesos contingentes que producen, al menos, un suceso observable.

Como se ha explicado anteriormente, el que este fenómeno sea modelado como un fenómeno aleatorio no implica la creencia en que el azar sea el único mecanismo generador de los ET. Todo lo contrario, la hipótesis de que para la realización de estos eventos se conjugan diversas situaciones y condiciones previsibles, constituye el núcleo del estudio de las discordancias, ya que el hecho de que cada ET tenga características, impactos y factores asociados que puedan ser observados, medidos y registrados, permite el análisis de las regularidades como expresiones de dinámicas específicas sobre las cuales la aleatoriedad solo se expresa en el plano individual, lo que retoma la idea de Germinal Cocho al señalar que, en números grandes, ‘no hay nada más determinista que la suma de funciones estocásticas’ (Martínez-Mekler, Cocho, G. et al, 2009).

Definición 28. Un *evento de tránsito* es la afectación o interrupción del tránsito de al menos un agente —vehículo o individuo en movimiento en un medio terrestre de circulación— que es observada, medida y registrada bajo condiciones regulares. Cuando su ocurrencia se especifica sobre un periodo de tiempo τ y dentro del espacio acotado ε , se escribe $ET(\varepsilon, \tau)$.

Los datos relacionados con un ET pueden estar parametrizados en tiempo y en espacio porque son resultados muestrales de una o varias DT que suceden en una población delimitada espacial y temporalmente, por lo que un ET es *la realización observable de una o más DT* que ha sido registrada en alguno de los intervalos de tiempo empleados en el sistema formal y que cumple con ser equidistante de longitud fija τ con $\tau = 1, \dots, n$ en alguna unidad de medida arbitraria.

Si en una unidad de tiempo τ pueden ocurrir más de un ET, entonces se emplea $ET_k(\varepsilon, \tau)$, en donde k denota a la k -ésima realización ordenada por el momento de ocurrencia dentro del periodo de tiempo especificado por τ . Lo anterior implica que, para todo k y $\tau \in [\alpha, \beta]$, se garantiza lo siguiente:

1. La colección $ET_1(\varepsilon, \tau), \dots, ET_k(\varepsilon, \tau), \dots, ET_n(\varepsilon, \tau)$ es finita y puede escribirse como $\{ET_i(\varepsilon, \tau)\}$ con $i = \overline{1, \dots, n}$.
2. A cada elemento de $\{ET_i(\varepsilon, \tau)\}$ con $i = \overline{1, \dots, n}$ le corresponde un elemento de la serie $\tau_1, \dots, \tau_k, \dots, \tau_n = \{\tau_i\}$ con $i = \overline{1, \dots, n}$, en donde cada τ_i denota el momento de ocurrencia de $ET_i(\varepsilon, \tau)$ dentro del periodo τ , para los n eventos de la familia.

Como puede deducirse, los tiempos de observación son arbitrarios y dependen por completo del sistema de registro. De este modo, la unidad primaria de la periodicidad y desagregación espacial de los análisis depende de las especificaciones dadas por los datos que representan a la ‘realidad’ y que, una vez procesados, pueden agregarse en escalas temporales o espaciales más amplias para, posteriormente, desagregar, interpolar o simular datos no recolectados con la intención de ampliar o profundizar la información o el conocimiento sobre ciertos aspectos, observando siempre las condiciones dadas por el *principio de regularidad estadística* que son necesarias para garantizar la calidad de las propiedades métricas.

2.2.1 Frecuencia: un sistema dinámico

La ocurrencia de las DT depende de las propiedades dinámicas del sistema en el que se desarrolla el tránsito, el conjunto normativo, la calidad de la infraestructura, los medios y espacios de posible circulación y las reglas y dispositivos de prevención y atención a involucrados en ET, especialmente a las víctimas en estado crítico de salud o con amenaza de perder la vida, así como las habilidades socioemocionales y el contexto sociocultural de las personas que circulan en él. No obstante, es posible inferir el impacto de ciertas acciones de política si se logra medir las propiedades del fenómeno y sus variaciones a través del tiempo y el espacio con un error controlado.

El estudio de poblaciones hipotéticas sujetas a diversos tipos de ET requiere de conceptos que sean operativos y concretos, tal es el caso de las definiciones sobre las realizaciones de un fenómeno que tiene consecuencias medibles y que está sujeto a incertidumbre con respecto a una o más magnitudes condicionadas por un suceso de interés, en particular los indicadores de ocurrencia, frecuencia, severidad o letalidad asociadas al transporte y sus interrupciones contingentes, para lo cual se emplean las siguientes definiciones.

Definición 29. La *frecuencia absoluta* de los ET es un proceso discreto que puede ser continuo o discreto en el tiempo y está dado por la colección de VA $\{\mathcal{N}(\varepsilon; \tau) \in \mathbb{N} \cup (0) \forall \tau \text{ y } \varepsilon\}$, que representa el número total de registros de ET en el sistema de referencia, entendidos como la materialización de los riesgos producidos por DT, dentro del espacio ε y ocurridos durante el periodo de tiempo $\tau \in$

$[\alpha, \beta)$, con unidades de medida dadas por $[\beta - \alpha]$, tal que $f_{ET}(\varepsilon, t)$ es la función de densidad de la ocurrencia de ET sobre el conjunto acotado por el binomio paramétrico (ε, τ) , para lo cual se cumple:

$$\mathcal{N}(\varepsilon; \tau) = \int_{\alpha}^{\beta} f_{ET}(\varepsilon, t) dt \quad (2.11)$$

Cuando la colección de tiempos $\{\tau - k, \tau - k - 1, \dots, \tau, \tau + 1, \dots, \tau + k\}$ es discreta, el proceso se escribe $\mathcal{N}_{\tau}(\varepsilon)$ y se estima de la siguiente manera:

$$\mathcal{N}_{\tau}(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau) \quad (2.12)$$

Para conocer la evolución y trayectoria de este tipo de procesos en las zonas urbanas y suburbanas (ATUS)²³ de México, INEGI tiene su propia metodología de agregación para sistematizar y publicar los registros de *Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas* (ATUS), la cual se modifica paulatinamente de acuerdo con la evolución de las zonas urbanas, estos conjuntos informativos constituyen en los registros más completos sobre población y eventos de tránsito terrestre en el país y contienen datos a nivel nacional, estatal y municipal desde 1997²⁴.

En la Figura 2.9 se observan los registros correspondientes al periodo de análisis descrito previamente, la línea en azul con marcadores circulares indica el número exacto de ET medidos en cada año con una escala en miles. Las líneas punteadas corresponden a las tendencias de evolución de la ST dadas por la estimación de dos modelos: lineal — línea en color café con coeficiente de determinación $R^2 = 0.1124$ — y potencial —línea verde con $R^2 = 0.4461$ —, obtenidas bajo el procedimiento definido por el modelo de regresión vía Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), las ecuaciones respectivas se presentan a la derecha y ambas señalan una tendencia creciente que no necesariamente coincide con la secuencia de los datos observados.

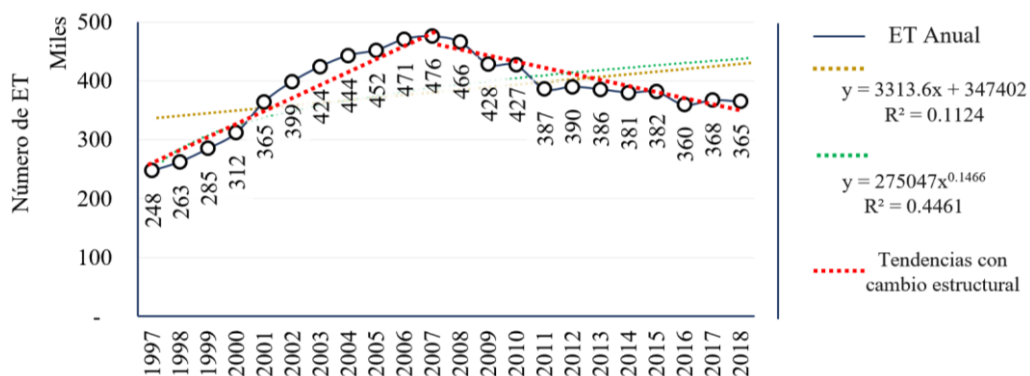
Además, como puede observarse, el que ninguno de los modelos presente un buen ajuste se debe a que ambas estimaciones son estáticas, lo que ya anticipa la necesidad de emplear métodos de análisis y

²³ Según INEGI (2020), el número de habitantes de una población determina si esta es rural o urbana, una población se considera rural ‘cuando tiene menos de 2 500 habitantes, mientras que la urbana es aquella donde viven más de 2 500 personas’.

²⁴ La recolección de datos para la ‘elaboración de la estadística de accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas inició en el año 1928, y los procedimientos para su obtención se han modificado paulatinamente. Estas estadísticas se refieren a la siniestralidad del transporte a nivel nacional, y se adquirirían mediante el acopio y procesamiento de los datos alusivos a los accidentes que ocurrían en zonas no federales.’ Para 2013, las cifras del Estado de México corresponden a 57 municipios que proporcionaron su información; en tanto que para los años 2014, 2015, 2016 y 2017 los municipios con información fueron 47, 52, 37 y 32 respectivamente. Los datos analizados están actualizados al 23 de julio de 2019.

pronóstico apropiados para la evolución dinámica de una serie de tiempo. A pesar de esta aclaración, es posible obtener alguna información útil, por ejemplo, que existen dos tipos de fluctuaciones en el número anual de ET durante las últimas dos décadas: la primera es monótonamente creciente y abarca de 1997 a 2007, en el que prácticamente se duplican los eventos —de 248 mil a 476 mil eventos— ; en el segundo, la evolución va en el sentido opuesto y el decrecimiento es más lento, pero también constante, acumulando una reducción equivalente a un cuarto de la cifra observada en 2007 —de 476 mil a 365 mil eventos—, lo que denota un cambio estructural en los registros de ET, señalado con las líneas en rojo.

Figura 2.26. Evolución de la frecuencia absoluta y tendencias de ATUS bajo MCO, 1997-2018

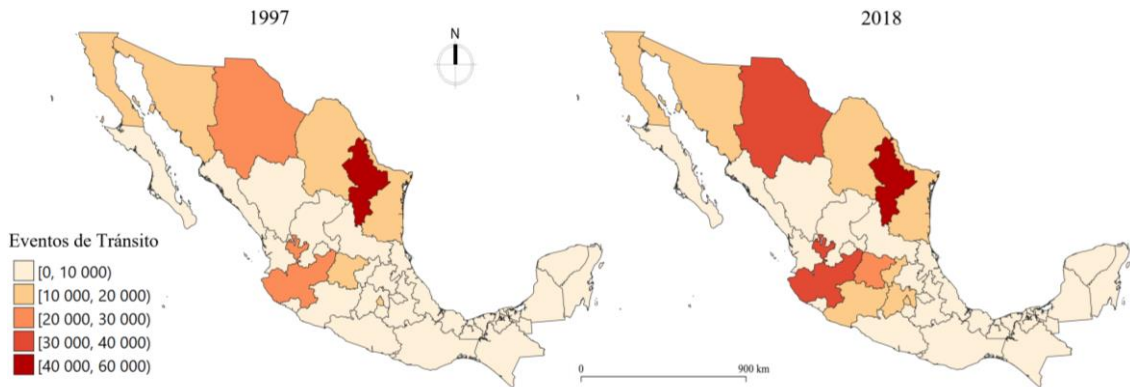


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Estimar las tendencias nacionales sirve para monitorear objetivos de largo alcance y realizar una rendición de cuentas a nivel sistema, por lo que analizar fenómenos a escala nacional también suele ser útil para abrir la conversación y diseñar estrategias basadas en evidencia, no obstante, los datos a este nivel pueden estar demasiado agregados para mostrar los efectos de ciertas intervenciones o políticas públicas específicas, por lo que la modelación de los ET demanda el uso de mejores herramientas y mayor granularidad en el análisis, comenzando por una desagregación que aborde las distintas escalas político-administrativas.

Desde luego, esta información también puede verse en forma más intuitiva mediante modelos cartográficos que muestren proyecciones geográficas en cortes anuales que permitan comparar, por ejemplo, dos momentos distintos. En los Mapas 2.3a y 2.3b se muestran los años de inicio y fin de los análisis con base en los datos detallados anteriormente para contrastar el año 1997 con el 2018. Como puede observarse, la distribución del orden de las entidades respecto a la magnitud parece invariante, no obstante, algunas de ellas presentan mayor frecuencia de ET, lo que señala la necesidad de revisar con mayor profundidad los tipos de ocurrencia y su impacto en escalas territoriales menores, como municipios y localidades.

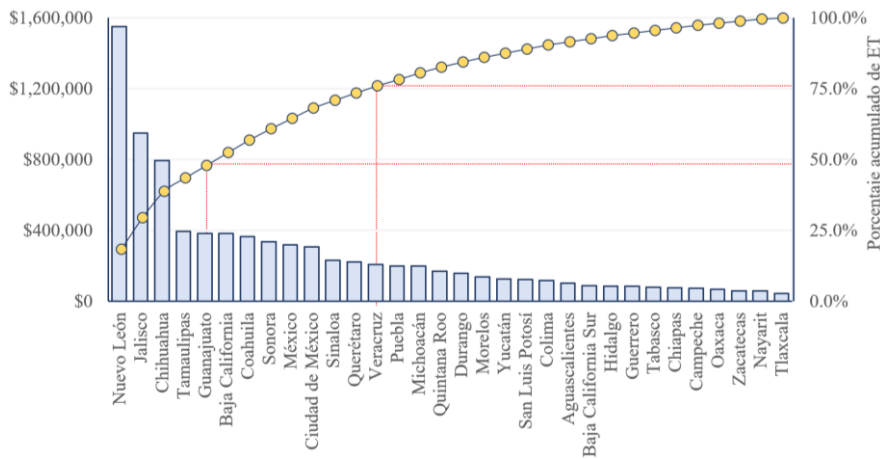
Mapas 2.27.a y 2.3b. Frecuencia absoluta de ATUS a nivel estatal en los años 1997 y 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

Para complementar el contraste de los Mapas 2.3 a y 2.3b, se presenta la Figura 2.10, en la cual Nuevo León resalta como la entidad federativa que posee la mayor frecuencia de ET ya que, en promedio, cada año registra 70 mil eventos, con un total de 1,551,154 ET en dos décadas, lo que representa el 18% de los ET en México. Por lo contrario, Campeche, Oaxaca, Zacatecas, Nayarit y Tlaxcala presentan los registros con el menor número de ET, la cifra acumulada es de 72,240, 67,121, 59,128, 57,903 y 42,572, respectivamente, lo que suma 2.7% del total entre los cinco estados, tal y como s.

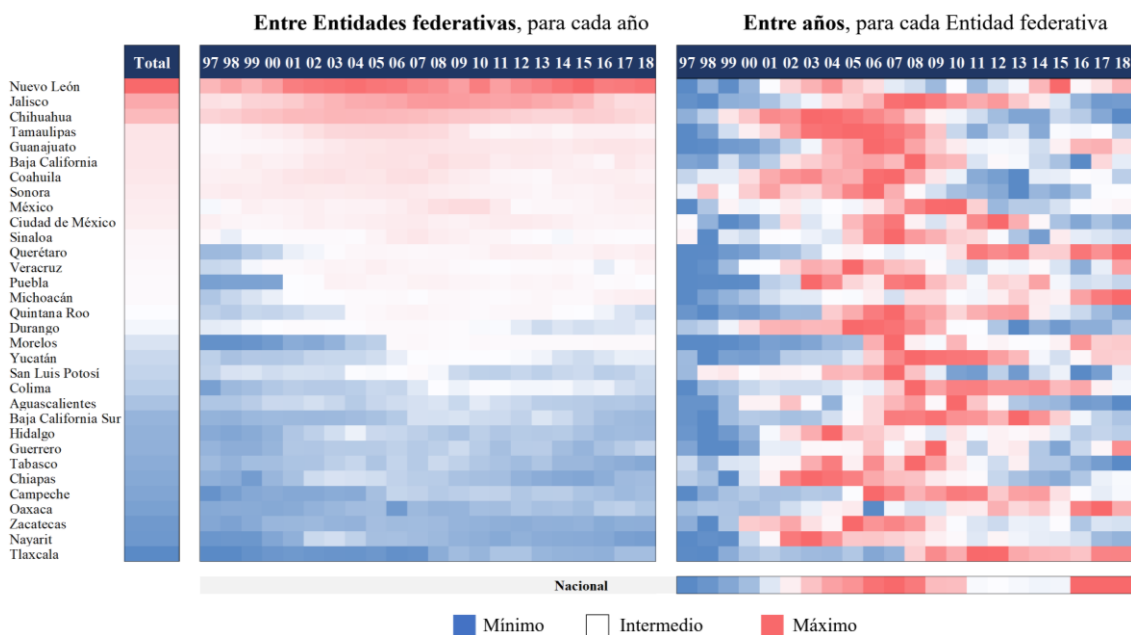
Figura 2.28. Porcentaje acumulado de ATUS por entidad federativa, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De la misma manera en que la Figura 2.8 muestra la evolución de la población en cada entidad mediante dos tipos de análisis en color graduado, la Figura 2.11 presenta los valores registrados por las secuencias estatales de ET ocurridos durante el periodo 1997-2018. En la matriz del lado izquierdo, la graduación del color corresponde a la comparación entre las 32 entidades federativas del país, mientras que la matriz del lado derecho muestra las variaciones en cada estado a lo largo del tiempo.

Figura 2.29. Distribución de ATUS en las entidades federativas, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De la figura anterior se identifican dos fuentes distintas de información y contraste:

1. Entre entidades:

- Nuevo León es el estado con mayor número acumulado en el registro de ET, seguido de Jalisco, Chihuahua y Tamaulipas.
- Querétaro, Veracruz y Puebla tenían bajo nivel de frecuencia hace dos décadas, pero su aumento gradual las ubica en el grupo de frecuencia media.
- Quintana Roo y Durango han permanecido históricamente en el grupo medio, no obstante, en los últimos años han disminuido su frecuencia significativamente.
- Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tabasco, Zacatecas, Nayarit y Tlaxcala tienen los registros con las cifras más bajas.

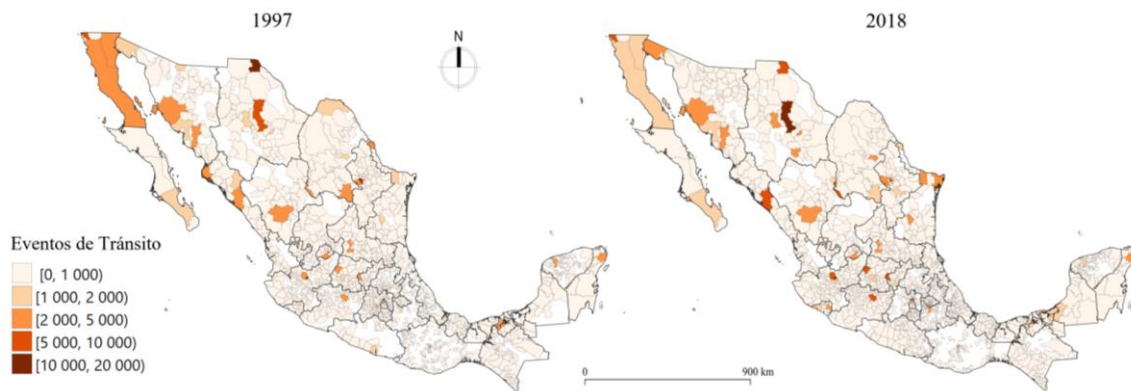
2. Entre años:

- La República Mexicana y la mayoría de sus entidades federativas presenta un aumento en la frecuencia en el periodo 2005-2009 y, posteriormente, vuelve a sus valores iniciales.
- Colima, Tlaxcala, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Querétaro y Oaxaca han incrementado su frecuencia en forma sostenida durante los últimos años.

- Chihuahua, Coahuila, Sonora y Zacatecas tuvieron incrementos importantes desde los primeros años de este siglo.

Los resultados anteriores dan una buena idea sobre el panorama actual de los ET. No obstante, al desagregar a escala municipal, la distribución y concentración de los ET en el territorio permite ver que las grandes urbes son las productoras de la mayoría de los eventos, tal y como lo muestran los Mapas 2.4a y 2.4b:

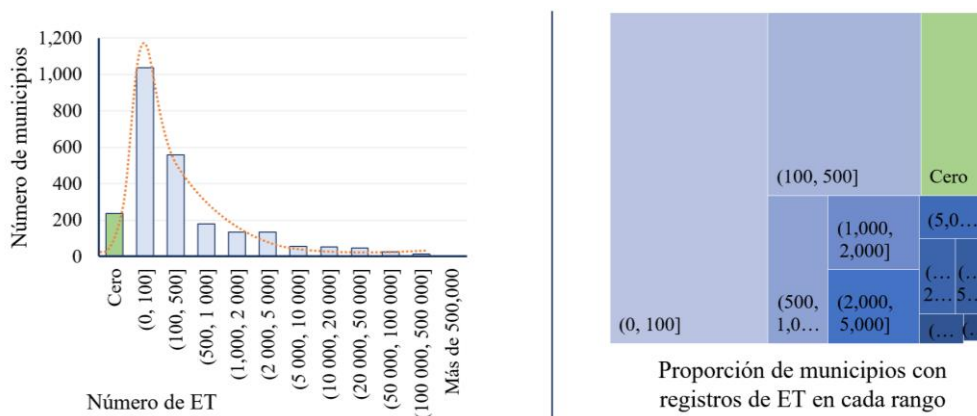
Mapas 2.30a y 2.4b. Frecuencia absoluta de ATUS a nivel municipal en los años 1997 y 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

De los mapas anteriores se deduce que en la mayoría de los municipios del país se han registrado ET, que unos pocos tienen una frecuencia mayor a 10 000 eventos y que los municipios con alto nivel de incidencia son relativamente pocos.

Figuras 2.31a y 2.12b. Histograma del número de municipios por ATUS acumulado 1997-2018

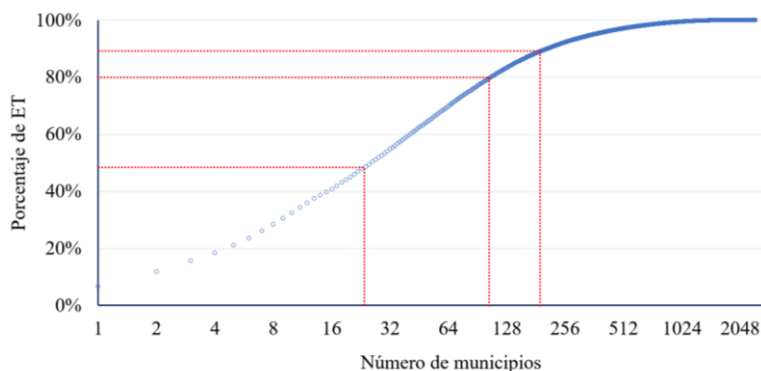


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En las Figuras 2.12a y 2.12b se puede constatar que, en los últimos 22 años, de los 2,464 municipios y alcaldías en el país, en 2,238 se ha registrado al menos un ET (90.5%) y solo en 236 no existen registros

de ET, además, solo 148 cuentan con un solo registro de ET y en 497 hay menos de 10. Además, el 50.2% de los ET se concentra en apenas 26 municipios (1.1% de los municipios), el 80.2% en 99 (4.0%) y el 90% en los 185 municipios con mayor frecuencia, apenas el 7.5% del número total de municipios.

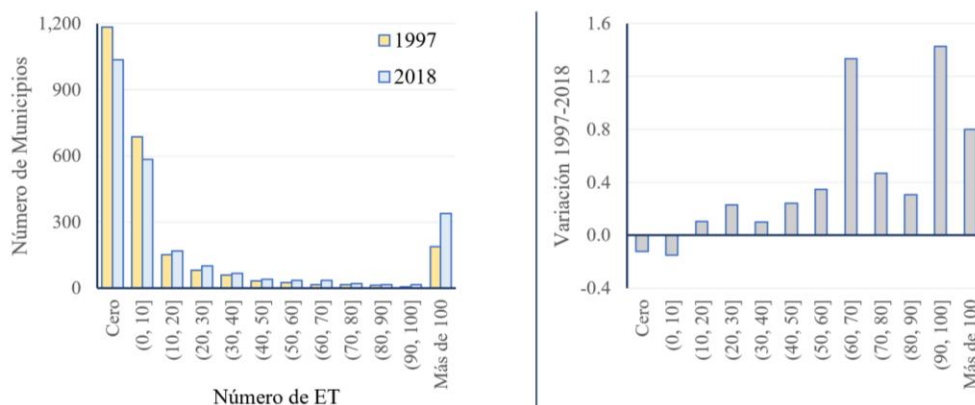
Figura 2.32. Frecuencia relativa acumulada de ATUS por número de municipios, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De este modo, la frecuencia acumulada brinda información complementaria para valorar en dónde es necesario intervenir y poder valorar las acciones de política mediante parámetros que coloquen las evidencias al centro. Por ejemplo, si se quisiera disminuir 20% la frecuencia de los ATUS, podrían enfocarse los esfuerzos en que los cinco municipios con mayor frecuencia reduzcan a cero sus eventos —algo que podría resultar imposible— o implementar una estrategia integral para disminuir a un tercio la frecuencia de ET en los 41 municipios de mayor incidencia, algo factible y que podría evaluarse en términos operativos y financieros para sumar fuerzas y recursos en los tres órdenes de gobierno. Ahora bien, para plantear más escenarios de intervención, es útil reconocer las variaciones en las frecuencias relativas durante el periodo de estudio.

Figura 2.33. Frecuencia relativa de ATUS, por número de municipios en 1997 y 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

Como se observa en la Figura 2.14, en 1997 hubo 1,282 (51.8%) municipios con ET, mientras que en 2018 fueron 1,247 (50.4%); aunque no son exactamente los mismos, la distribución es relativamente estable: 911 municipios registran ET todos los años (36.8%), 371 (15.0%) de los que registraron ET en 1997 no lo hicieron en 2018 y 336 (13.6%) se incluyeron a la lista más reciente de ET.

De este modo, aunque la concentración de los ET parece ser invariante en el tiempo para la mayoría de los municipios, 692 (28.0%) disminuyeron su registro de ET en forma significativa. En la Tabla 2.1 se observa a todos los municipios con un decremento superior a 1,000 ET y el porcentaje que representa, los que muestran mayor decremento son Juárez y Guadalajara, que disminuyeron 8,758 (-68.7%) y 8,190 (-51.2%) ET, respectivamente.

Tabla 2.1. Municipios con decremento en el registro de ATUS entre 1997 y 2018

Municipio	1997	2018	Decremento de ET	Tasa de decremento de ET
Juárez	12,751	3,993 -	8,758	68.7%
Guadalajara	16,004	7,814 -	8,190	51.2%
Saltillo	4,157	789 -	3,368	81.0%
Durango	4,418	1,447 -	2,971	67.2%
Chihuahua	9,420	6,716 -	2,704	28.7%
Mérida	3,623	928 -	2,695	74.4%
Hermosillo	4,435	1,981 -	2,454	55.3%
Ahome	2,017	137 -	1,880	93.2%
San Luis Potosí	3,275	1,554 -	1,721	52.5%
Nuevo Laredo	3,067	1,354 -	1,713	55.9%
Centro	2,414	772 -	1,642	68.0%
Badiraguato	1,639	33 -	1,606	98.0%
Culiacán	4,500	2,918 -	1,582	35.2%
Tuxtla Gutiérrez	1,724	327 -	1,397	81.0%
Mexicali	3,094	1,710 -	1,384	44.7%
Aguascalientes	3,246	1,942 -	1,304	40.2%
Cuahtémoc	2,311	1,104 -	1,207	52.2%
Nogales	1,586	445 -	1,141	71.9%
Naucalpan de Juárez	1,177	143 -	1,034	87.9%

Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por el contrario, hay 884 (35.7%) municipios que han incrementado sus registros de ET en el mismo periodo. En la Tabla 2.2 se observa a todos los municipios con un incremento superior a 1,000 ET y el porcentaje que representa; como puede observarse en la Tabla 2.2, los más afectados por las DT son Monterrey y Querétaro, con un aumento de 12,831 (68.0%) y 6,894 (262.1%), respectivamente. Mineral de la Reforma, un municipio con un Índice de Desarrollo Humano considerado ‘Muy alto’ por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y que en 1997 no registró ningún ET, registró 1,013 ET, un fenómeno que ofrece una oportunidad para comprender qué ha cambiado en relación con la dinámica vial que haya podido disparar este indicador en este lugar.

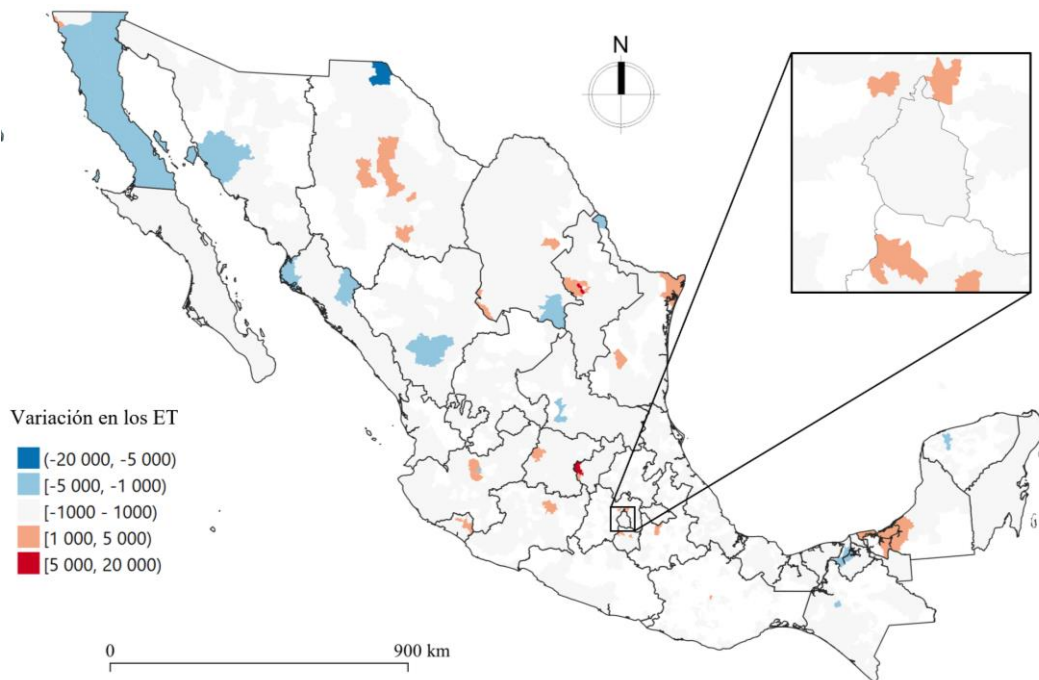
Tabla 2.2. Municipios con incremento en el registro de ATUS 1997 y 2018

Municipio	1997	2018	Incremento de ET	Tasa de incremento de ET
Monterrey	18,876	31,707	12,831	68.0%
Querétaro	2,630	9,524	6,894	262.1%
Ecatepec de Morelos	66	4,030	3,964	6006.1%
Morelia	2,698	6,215	3,517	130.4%
Apodaca	984	4,088	3,104	315.4%
San Nicolás de los Garza	7,723	10,777	3,054	39.5%
García	165	3,066	2,901	1758.2%
Puebla	1,095	3,936	2,841	259.5%
Gral. Escobedo	454	2,912	2,458	541.4%
Zapopan	3,233	5,220	1,987	61.5%
Matamoros	431	2,366	1,935	449.0%
Ensenada	2,936	4,799	1,863	63.5%
San Pedro Garza García	5,863	7,661	1,798	30.7%
Santa Catarina	2,115	3,888	1,773	83.8%
San Luis Río Colorado	1,529	3,297	1,768	115.6%
Cuernavaca	273	1,559	1,286	471.1%
Gómez Palacio	691	1,853	1,162	168.2%
Uruapan	341	1,386	1,045	306.5%
Xalapa	1,344	2,378	1,034	76.9%
Carmen	424	1,451	1,027	242.2%
Mineral de la Reforma		1,013	1,013	Sin ET en 1997

Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para profundizar un poco más en las variaciones, el Mapa 2.5 muestra que son pocos los municipios en los que los ET han aumentado drásticamente, es decir, la ocurrencia de los ET no muestra evidencias de ser azarosa en el territorio. Desde luego, esta afirmación está lejos de ser positiva, ya que muestra que las externalidades negativas del transporte son estables, lo que a menudo induce a las autoridades a aceptar su ocurrencia como parte de la normalidad y dificulta la mejora de los sistemas de atención y prevención aludiendo indirectamente a ‘las fuerzas del determinismo social’.

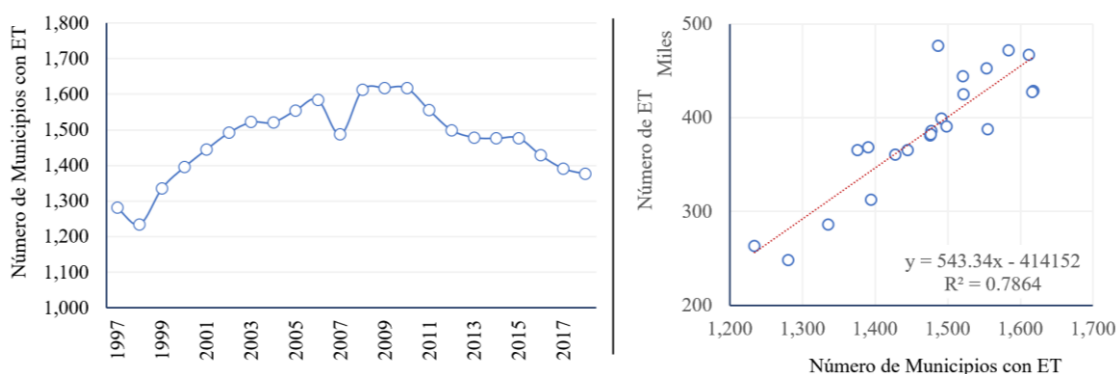
Mapa 2.34. Variación de ATUS municipal en el periodo 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por otro lado, como es de esperarse, el aumento en el número de municipios que registran ET coincide con el aumento en la frecuencia total de ET ($R^2=0.7864$, $p<0.001$) lo que podría interpretarse de la siguiente manera: cada municipio tiene su dinámica local que produce ET con ciertas tendencias, por lo que la emergencia de nuevos espacios de discordancias de tránsito implica nuevos ET donde antes no los había, tal como se observa en la Figura 2.15, que señala esta relación.

Figura 2.35. Evolución del número de municipios con registros de ATUS en cada año, 1997-2018



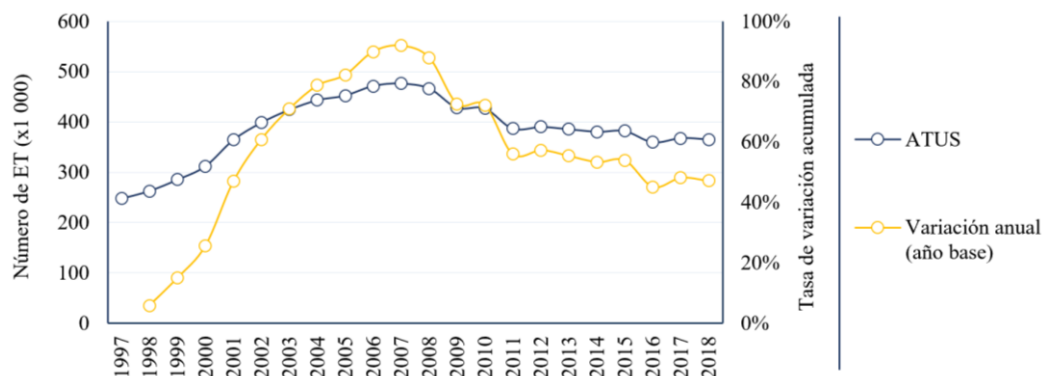
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Ahora bien, existen múltiples variaciones en el tiempo y el espacio que son de magnitud importante y que merecen estudiarse con mayor detalle. Por ello, el estudio de las variaciones interanuales permite observar los cambios de corto plazo y el impacto de ciertas acciones localizadas. Para complementar el estudio de la evolución, el análisis de las variaciones respecto al año base brinda la oportunidad de comprender la tendencia del fenómeno y valorar el impacto de las intervenciones sostenidas, así como colocar metas de mediano y largo plazo que comprometan acciones de política pública y el uso de evidencias para la rendición social de cuentas.

En la Figura 2.16 se muestra la evolución del número de ET y de la variación anual respecto al año base; como puede observarse, ambas poseen las mismas características ya que una es una transformación lineal de la otra.

La línea amarilla señala que los ET tuvieron un crecimiento sostenido durante los últimos años del milenio pasado hasta casi duplicarse en los años 2006 y 2007. Después del año 2008 comenzaron a descender para mantenerse alrededor del 45-55 por ciento de los niveles observados en el año base. Dado que el número de ET registrados muestra una curva unimodal cuyo máximo se da en el año 2007, una conclusión apresurada podría sugerir que es a partir de 2008 en donde el fenómeno comienza a descender, por tal motivo, también tendrían cabida diversas explicaciones sobre las acciones que motivaron el decremento en el año previo.

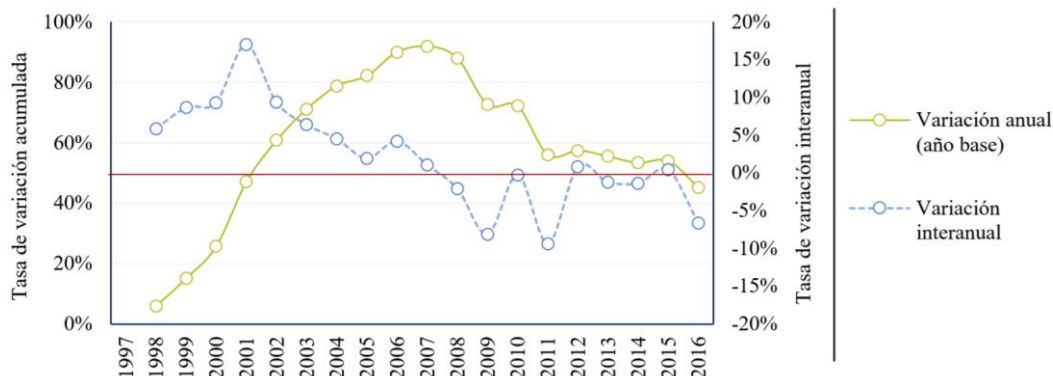
Figura 2.36. Evolución de las registros de ATUS nacional, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para indagar un poco más sobre la afirmación anterior, en la Figura 2.17 se muestra la evolución de las series de ambos modos de variación y cómo entre ambas es posible identificar dos fenómenos distintos: el de inicio del cambio de tendencia y el de la consolidación de ese cambio. La línea sólida en color verde muestra que los ET crecieron sostenidamente hasta alcanzar 92% en 2007, para luego descender monótonamente hasta ubicarse en 45% de la cifra inicial.

Figura 2.37. Evolución de las variaciones interanuales y respecto año base. ATUS 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Asimismo, las variaciones interanuales exhibidas mediante la línea punteada señalan que, en realidad, el fenómeno comenzó a descender desde el año 2002, en el que se muestra el máximo de incremento respecto al año anterior (17.1%), para luego descender sostenidamente hasta volverse negativa en 2008 y mantenerse en valores inferiores a 1% en los siguientes años, lo que implica un proceso de reversión de la tendencia mucho más consistente con la dinámica social y los tiempos que conlleva la implementación de una política pública.

2.2.1 Severidad: una familia de consecuencias

La ocurrencia de ET posee una enorme variedad de características, las cuales pueden agruparse, al menos, en los siguientes dominios: 1) Condiciones de circulación, 2) Rasgos emocionales y psicosociales de los involucrados, 3) Contexto socioeconómico y cultural, 4) Dinámica del evento y 5) Conjunto de consecuencias. Las consecuencias se relacionan con la severidad del ET y existe una enorme gama de tipologías posibles, las cuales pueden ser desagregadas en el nivel que las mediciones lo permitan. En general, existen dos formas de estimar la distribución de la severidad: paramétrica y no paramétrica (Liu y Forrest, 2010), en el ‘paramétrico’ se supone o conoce la distribución de los eventos, en un método ‘no paramétrico’ se analizan los datos sin distribución en forma funcional.

Para analizar la severidad de las DT es útil contar con una clasificación primaria que establezca un orden en dos niveles disjuntos que dependan de si el ET afecta, o no, a la integridad del ser humano. En México existe una tipología definida por INEGI que se usa desde hace más de tres décadas para separar en clases el impacto de un ET y que, de acuerdo con el *Catálogo de accidentes de tránsito*, se denominan: 1) *Fatales*, en el cual una o más personas fallecen en el lugar del evento, 2) *No fatales*, en el cual una o más personas resultan con lesiones y 3) *Solo daños*, aquellos en el que solo ocurrieron daños materiales (INEGI, 2020),

La clasificación de INEGI ha permitido armonizar las fuentes de datos y aumentar la consistencia del registro de todos los niveles administrativos y de gobierno sobre los ATUS, lo que también permite generalizar esta y cualquier otra desagregación posible, por lo cual se propone la siguiente definición.

Definición 30. Los ET implican un número arbitrario de m consecuencias observables C_m , $m \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, que separan cualitativamente la magnitud del evento en clases disjuntas que permiten definir estados del proceso después de ocurrido el evento. Ningún ET puede pertenecer a dos clases distintas.

Un corolario sobre el número $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$ y su esperanza matemática $E[\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)] = n_\tau(\varepsilon)$ es que para este proceso de conteo y para todas y cada una de las C_m clases de consecuencias medidas por el proceso, se cumplen las siguientes igualdades:

$$\mathcal{N}(\varepsilon, \tau) = \sum_{k=1}^{\mathcal{N}_t} ET_k(\varepsilon, \tau) = \sum_{i=1}^{C_m} \sum_{k=1}^{\mathcal{N}_t} ET_k(\varepsilon, \tau; i) = \sum_{i=1}^{C_m} \mathcal{N}(\varepsilon, \tau; i) \quad (2.13)$$

$$\mathcal{N}(\varepsilon, \tau; [t, t+h]) = \mathcal{N}(\varepsilon, \tau)|_t^{t+h} = \sum_{k=t}^{t+h} \mathcal{N}(\varepsilon, \tau; k) \quad (2.14)$$

$$\mathcal{N}(\varepsilon, \tau; [C_m, C_{m+r}]) = \sum_{h=C_m}^{C_{m+r}} \mathcal{N}(\varepsilon, \tau; h) \quad (2.15)$$

Lo que implica lo siguiente:

$$\mathcal{N}(\varepsilon, \tau; [C_m, C_{m+r}]; [t, t+h]) = \sum_{h=C_m}^{C_{m+r}} \sum_{k=t}^{t+h} \mathcal{N}(\varepsilon, \tau; h, k) \quad (2.16)$$

También es necesario señalar que cada elemento de la suma en la ecuación 2.16 es una variable aleatoria y que el número de elementos es también aleatorio, pudiendo tomar el valor de cero cuando no se registran ET en el periodo de estudio, algo que cobra sentido cuando se analiza un territorio o una categoría específica, o bien cuando no se han producido defunciones en una demarcación durante cierto periodo.

A partir de estas definiciones es posible realizar algunas estimaciones con los registros nacionales sobre ET. Para el contexto mexicano, $r = 3$ y durante el periodo de estudio se registraron 8,480,853 ET, los cuales produjeron 102,867 (1.2%) eventos fatales, 1,861,320 (21.9%) no fatales y 6,516,981 (76.8%) fueron solo daños, lo que provocó 122,587 defunciones.

A partir de estos datos, la ecuación de balance para el registro ATUS de México es:

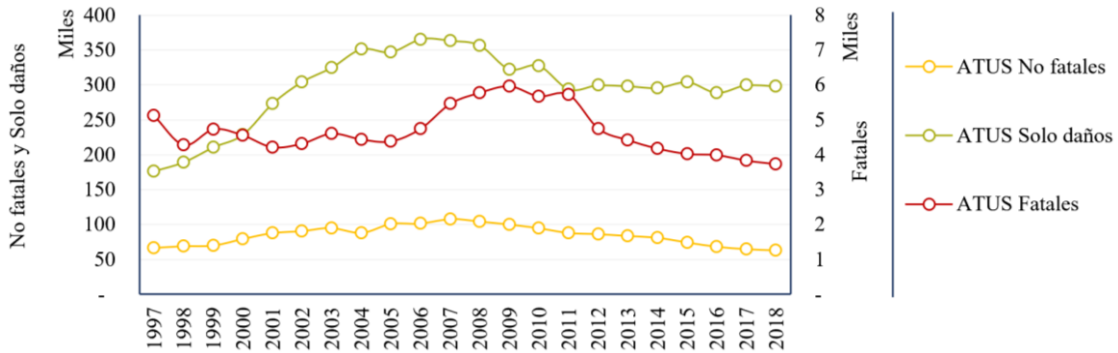
$$n(ATUS)|_{1997}^{2018} = n((1997, 2018); ATUS) = \sum_{t=1997}^{2018} \sum_{i=i}^3 n_t(ATUS; i) = 8,480,853 \quad (2.17)$$

Para estudiar la distribución de las diferentes clases de consecuencias de ET a lo largo del tiempo, es necesario estimar sus variaciones en distintos modos, lo que propone un análisis diferenciado de las series de tiempo dadas por $n(ATUS)|_{1997}^{2018} = n((1997, 2018); ZUS) = n(Total; ATUS)$, en donde

$$n_t(ATUS) = n_t(ATUS, Fatales) + n_t(ATUS, No fatales) + n_t(ATUS, Solo daños) \quad (2.18)$$

En la Figura 2.18 se muestran los valores desagregados de la ecuación 2.18 a lo largo del periodo. En el eje principal —lado izquierdo— se muestran las frecuencias absolutas de los ET que no produjeron fatalidades —*ET-No fatales* y *ET-Solo daños*, mientras que el eje secundario —lado derecho— muestra a aquellos ET que produjeron defunciones —*ET-Fatales*—, ambas escalas se representan en miles.

Figura 2.38. Evolución de la frecuencia absoluta de cada clase de ATUS, 1997-2018

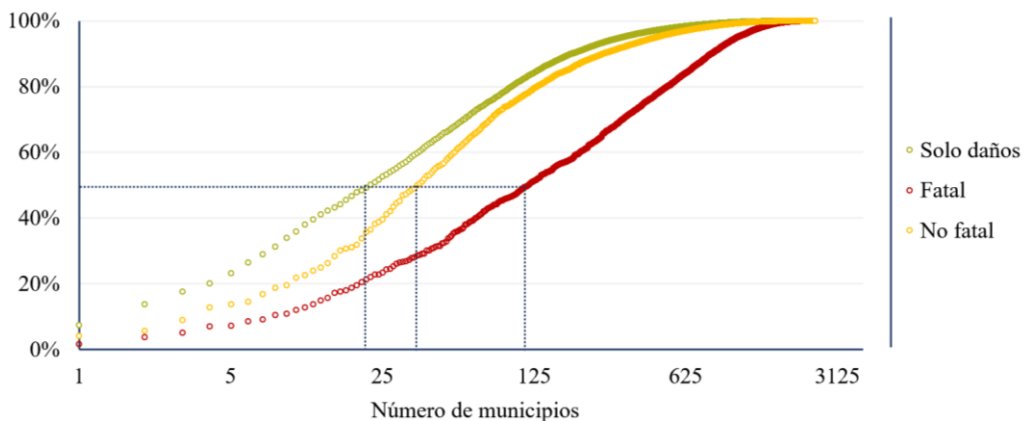


Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 2.18, la evolución de las clases de ET muestra distintos patrones con dos tendencias. La primera es ascendente y abarca 11 años: comienza en 1997 con un total de 248,114 ET, de los cuales 66,512 (26.8%) fueron no fatales y 5,117 (2.1%) fatales con 6,039 defunciones, alcanzando su punto más alto en 2007 con 476,279 ET, 107,732 (22.6%) eventos no fatales y 5 456 (1.1%) eventos fatales, lo que provocó 5,536 defunciones. La segunda tendencia es decreciente durante el periodo 2008-2018 y alcanza 365,167 ET en 2018, con 63,168 (18.8%) eventos no fatales y 3, 387 (1.1%) fatales con 4,227 fallecimientos.

Como es de esperarse, la distribución de las tres clases de consecuencias no es aleatoria en el territorio, como muestra la Figura 2.19 en la que se observa fácilmente cómo se acumulan los ET de cada clase en las distintas escalas. Por ejemplo, a escala municipal, el 50% de los *ET-Solo daños* se acumulan en apenas 22 municipios, mientras que los *ET-No fatales* lo hacen en 46 y los *ET-Fatales* en los 108 con mayor concentración de eventos.

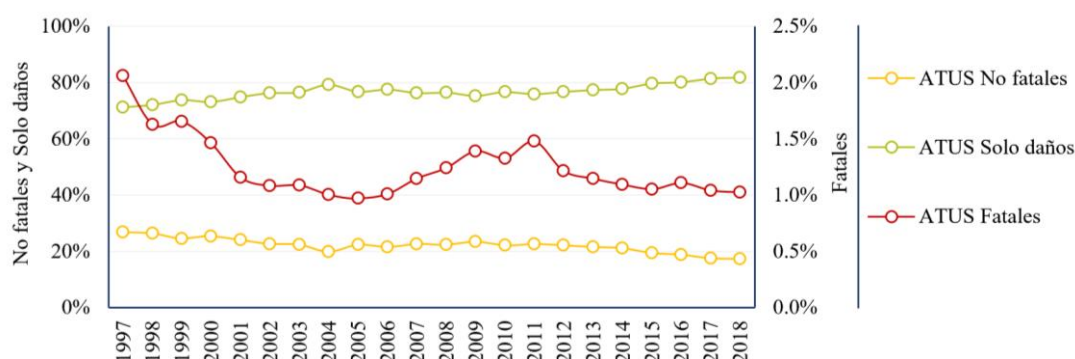
Figura 2.39. Frecuencia acumulada de cada clase de ATUS, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018).

Por su parte, como puede observarse en la Figura 2.20, la proporción de las clases de ET también varían significativamente: mientras los *ET-Solo daños* crecen constantemente, los *ET-No fatales* se conducen como complemento y decrecen a un ritmo similar. Por su parte, los *ET-Fatales* muestran una tendencia decreciente en el largo plazo con un periodo de crecimiento abrupto que comprende de 2006 a 2011 y que, aparentemente, no coincide con aumentos en la frecuencia de los ET. Las fuentes de explicación a este fenómeno son probablemente la evolución de las tecnologías y de las distintas medidas de protección ante las DT, así como la mayor y mejor calidad de los registros; de este modo, aunque los ET han aumentado 47% de 1997 a 2018, los que producen heridos y fallecimientos parecen ir decreciendo.

Figura 2.40. Evolución de la frecuencia relativa de cada clase de ATUS, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

ET Fatales

Para valorar la frecuencia absoluta en cada estado y su evolución a lo largo del tiempo, es útil analizar la Figura 2.20, que muestra la evolución de los *ET-Fatales* a lo largo del periodo 1997-2018 y, como ya se ha explicado, permite ver la dominación de cada estado y su evolución a lo largo del tiempo.

De la figura anterior destaca lo siguiente:

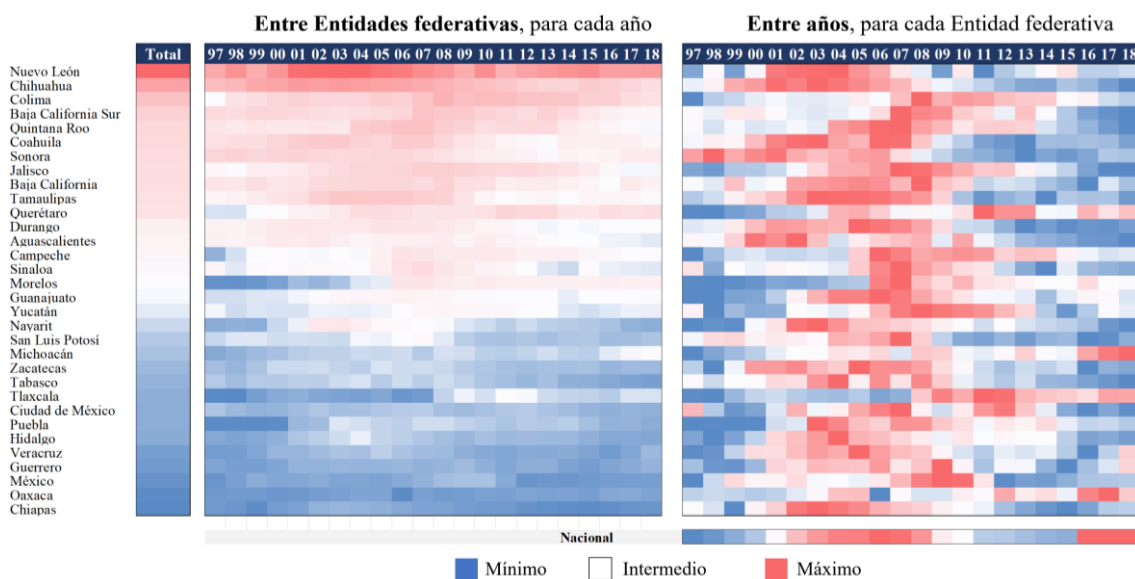
1. Entre entidades:

- En donde el Estado de México domina los *ET-Fatales* con 9.7% del total, seguido de Jalisco (9.3%), Chihuahua (6.7%), Ciudad de México (6.2%), Sinaloa (5.6%), Michoacán (5.5%) y Nuevo León (5.0%), que juntos reúnen el 48.1%.
- Por lo contrario, las 9 entidades con menor participación son Hidalgo (1.5%), Nayarit (1.3%), Morelos (1.3%), Yucatán (1.3%), Guerrero (1.2%), Tlaxcala (1.2%), Colima (0.9%), Baja California Sur (0.7%) y Campeche (0.6%), que entre todos suman apenas 10%.

2. Entre años:

- De forma parecida a los *ET-Totales*, la mayoría de las entidades presenta un aumento significativo en su frecuencia, aunque, como se ha mencionado antes, el desfase de un año produce que el periodo sea 2006-2011 y después comienza a volver a sus valores iniciales.
- En 17 entidades la frecuencia es más alta en 2018 que en 1997, observándose la mayor variación en los estados de Tlaxcala (535.7%), Campeche (306.7%), Quintana Roo (254.3%), Querétaro (243.5%), Baja California Sur (190.5%), Michoacán (181.0%) y Morelos (174.4%).
- Si bien es cierto que en Colima se evidenció un aumento de cuatro veces la frecuencia de ET registradas en 1997, los ET fatales permanecen invariantes.
- Por otro lado, son 14 las entidades que han disminuido los ET a valores inferiores a los observados en 1997: Guanajuato (93.5%), Coahuila de Zaragoza (79.3%), Chiapas (78.6%), Sinaloa (76.8%), Tabasco (73.3%), Oaxaca (70.8%), Yucatán (70.0%), Estado de México (55.1%), Hidalgo (52.5%), Jalisco (44.8%), Nuevo León (44.8%), Aguascalientes (36.3%), Ciudad de México (35.9%) y Baja California (17.4%).

Figura 2.41. Distribución y evolución de los *ET-Fatales*. ATUS estatal, 1997-2018

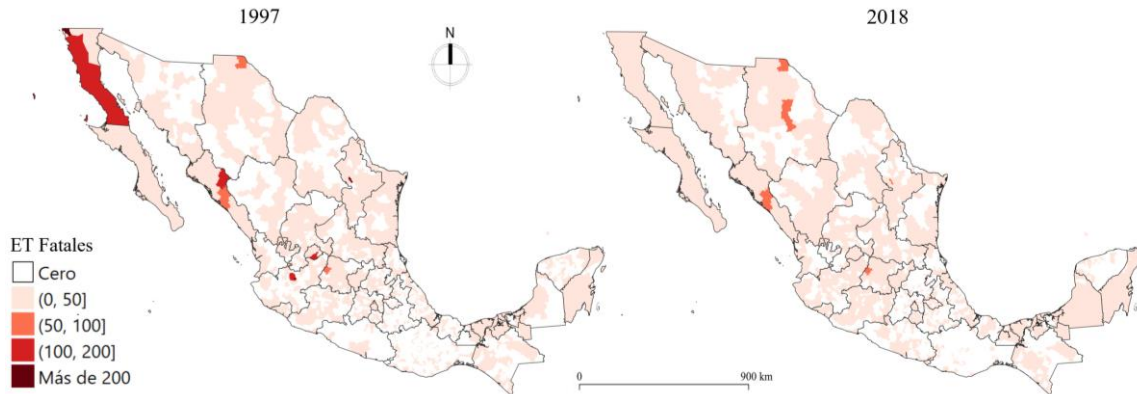


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A pesar de que la distribución de los *ET-Fatales* permanece invariante a lo largo del tiempo e incluso con menor frecuencia en aquellos que presentaban más concentración, la variación de las entidades se explica por las variaciones en los municipios más urbanos. Los Mapas 2.6a y 2.6b muestran que en 1997 hubo 1,282 municipios con ET Fatales, mientras que en 2018 el número de municipios con este

tipo de eventos aumentó a 1,427, lo que representa 11.2% en 20 años, un proceso de difusión que puede corresponder al aumento del tránsito en esos municipios.

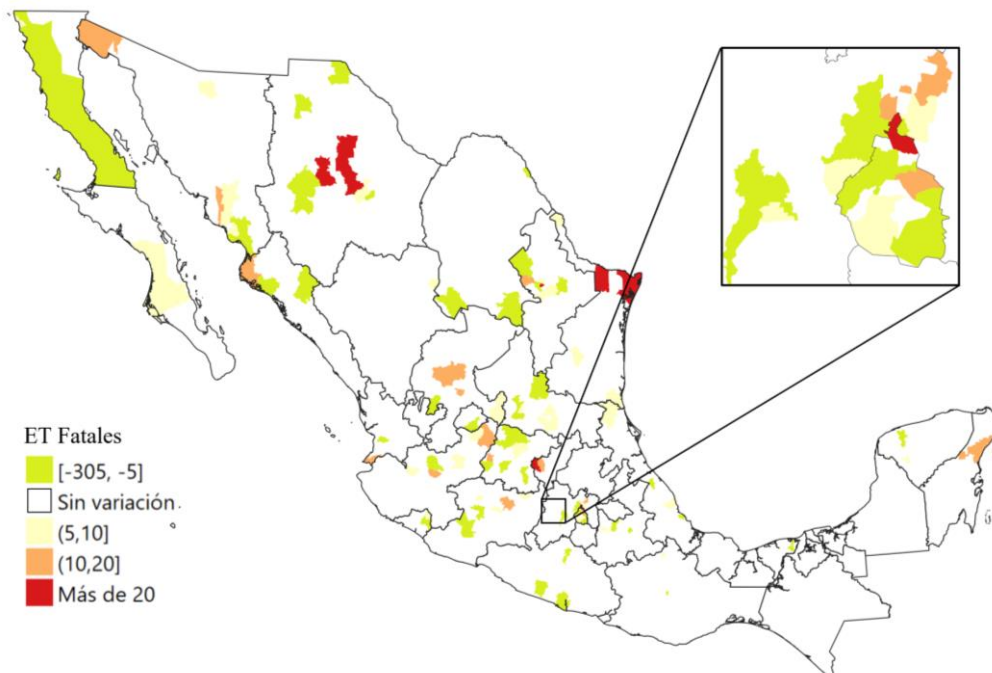
Mapas 2.42a y 2.6b. Distribución de los *ET Fatales*. ATUS municipal, 1997 y 2018



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

Adicionalmente, los registros de *ET-Fatales* a nivel nacional apenas crecieron 2%, por lo que los municipios que han aumentado más de 20 eventos por año son pocos: Gustavo A. Madero (31), Chihuahua (29), Querétaro (28), Reynosa (23), Guadalupe (23), Cuauhtémoc (23), Matamoros (22) y San Francisco del Rincón (20), tal y como se observa en el Mapa 2.7, que muestra, en color graduado de verde a rojo, las variaciones a nivel municipal de los *ET-Fatales* durante el periodo 1997-2018.

Mapa 2.43. Variación de los *ET-Fatales* en el periodo 1997-2018, ATUS municipal



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

ET No Fatales

Los *ET-No fatales* también pueden ser de alta consecuencia, ya que, en términos de gravedad, los afectados de modo más grave son los peatones, ciclistas y motociclistas —denominados fuertemente vulnerables—, quienes, además de sufrir una mayor estancia hospitalaria —6.1 y 4.9 días de estancia promedio, en comparación con 1.5 días en ciclistas o 2.4 días en ocupantes de vehículo de motor—, presentan mayor frecuencia con cifras que superan 4% del total de egresos hospitalarios por dichas causas (Lozano A., 2003). Además, de acuerdo con Vázquez-Vela (2003), cada año se producen más de 18,000 incapacidades permanentes.

En la Figura 2.22 se puede reconocer qué entidades experimentan mayor número de ET y su evolución en el tiempo, entre lo que resalta lo siguiente:

1. Entre entidades:

- Otra vez, Nuevo León posee el mayor porcentaje de ET No fatales (11.8%), seguido de Chihuahua (9.5%), Sonora (6.2%), Baja California (5.1%), Guanajuato (5.0%), Sinaloa (5.0%) y Jalisco (4.7%), que en conjunto suman el 47.3% de los ET No fatales.
- Por lo contrario, las 6 entidades con menor frecuencia son Oaxaca (1.0%), Hidalgo (1.0%), Campeche (0.9%), Baja California Sur (0.9%), Zacatecas (0.6%) y Tlaxcala 0.4%), que entre todos suman apenas 4.9%.

Figura 2.44. Distribución y evolución de los *ET- No fatales*. ATUS estatal, 1997-2018



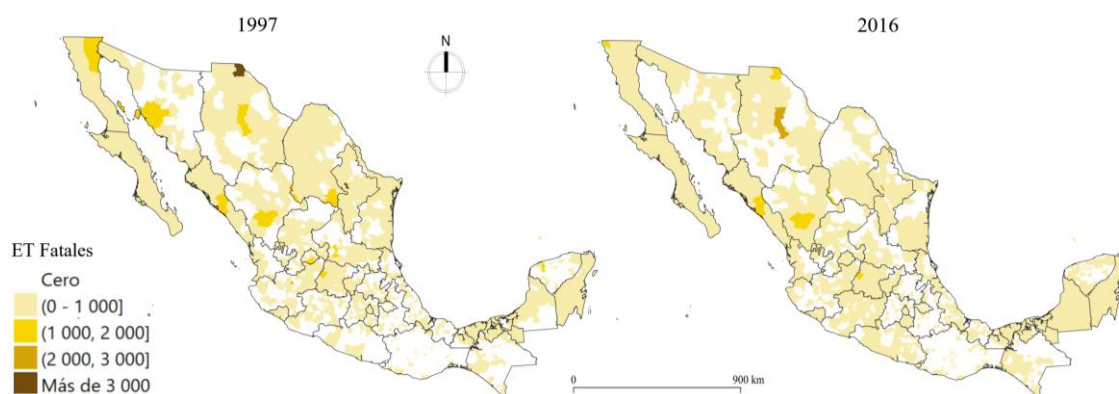
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

2. Entre años:

- De forma parecida a los ET totales, la mayoría de las entidades presenta un aumento significativo en su frecuencia a mitad de la primera década del milenio. No obstante, algunas entidades como Nuevo León, Chihuahua, Veracruz y Durango muestran aumentos significativos desde 2001 y 2002 y una disminución de esta ‘ola e ET’ que culmina antes que los estados que comenzaron esta pandemia en un año posterior.

Al igual que en las otras clases de ET, existe un conjunto relativamente estable de municipios en los que ocurren *ET-No fatales*, desde luego, existen variaciones en las magnitudes. En los Mapas 2.8a y 2.8b se observa su frecuencia absoluta y cómo el fenómeno se encuentra ampliamente distribuido a lo largo del territorio.

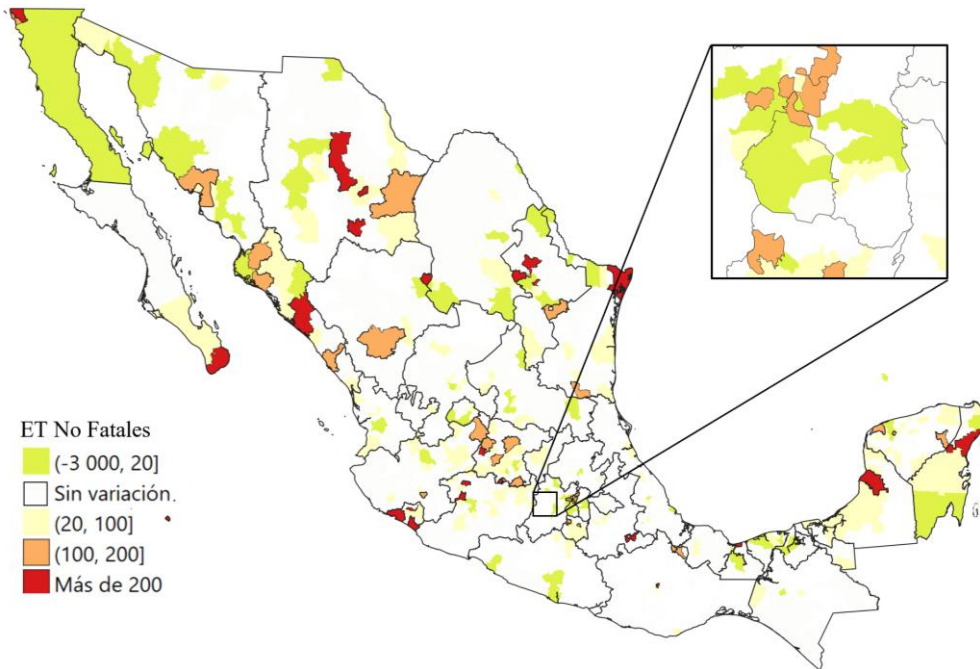
Mapas 2.45.a y 2.8b. Distribución de los *ET-No Fatales*. ATUS municipal, 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Por su parte, en el Mapa 2.9 se observa que en 54 municipios se observa un aumento mayor a 100 eventos y que en 39 disminuyó en más de 100. Es relevante mencionar que justo aquellos municipios con mayor densidad poblacional son los que experimentan mayor aumento de ET tales como Naucalpan de Juárez, Acapulco, Zapopan, Cajeme, Saltillo, Nuevo Laredo, Toluca, Guadalupe, Benito Juárez, Hermosillo, San Luis Potosí, Miguel Hidalgo, Mexicali, San Nicolás de los Garza, Juárez, San Pedro Garza García, Guadalajara y Monterrey; mientras que los municipios; mientras que la disminución más importante se observa en Chihuahua, García, Tecomán, Tijuana, Matamoros, Morelón, Gómez Palacio, Delicias y San Francisco del Rincón y Coahuila de Zaragoza.

Mapa 2.46. Variación de los ET-No fatales en el periodo 1997-2018, ATUS municipal

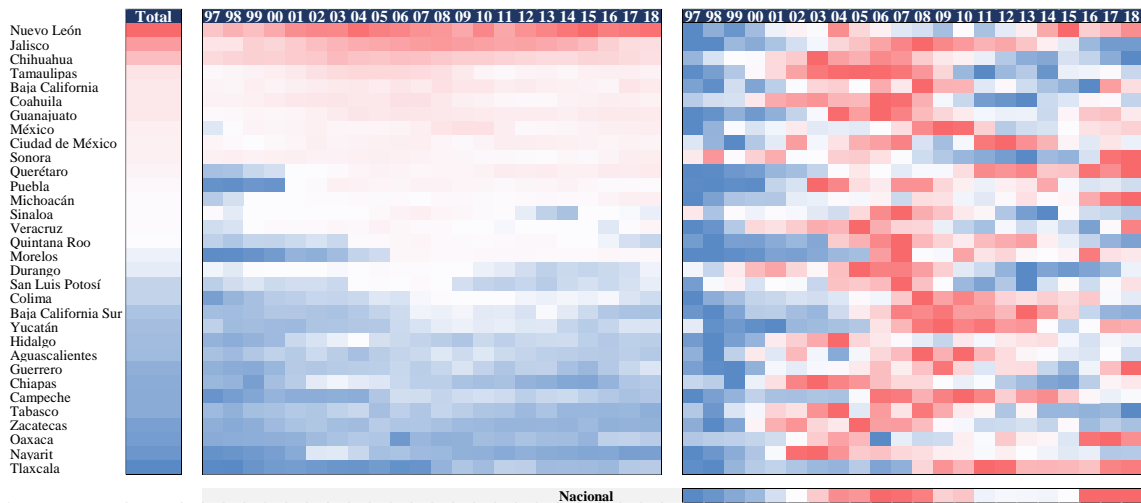


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

ET Solo Daños

Como se puede observar, la Figura 2.23 es prácticamente idéntica a la Figura 2.22 en cuanto a la distribución entre las entidades, ya que preserva el mismo orden, dado que la intensidad de Nuevo León (20.0%), Jalisco (13.7%), Chihuahua (9.6%), Tamaulipas (4.8%) y Baja California (4.3%) reúnen al 52.4% del total de ET-Solo daños.

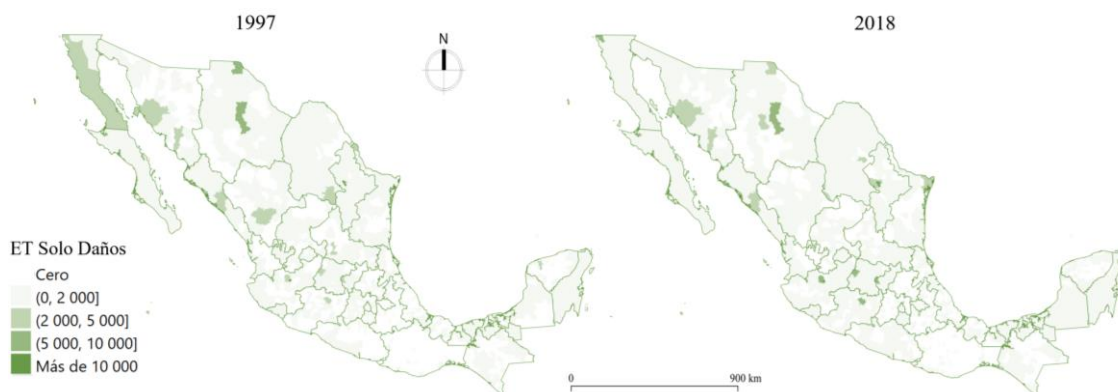
Figura 2.47. Distribución y evolución de los ET-Solo daños. ATUS estatal, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En el mismo sentido que la representación anterior, las variaciones a nivel municipal son las mismas que en los *ET-Totales*, ya que, como se ha señalado, aunque la concentración de los ET parece ser invariante en el tiempo para la mayoría de los municipios, 469 (18.7%) disminuyeron su registro de ET y 982 (39.3%) aumentaron, lo que se sintetiza al contrastar los Mapas 2.10a y 2.10b.

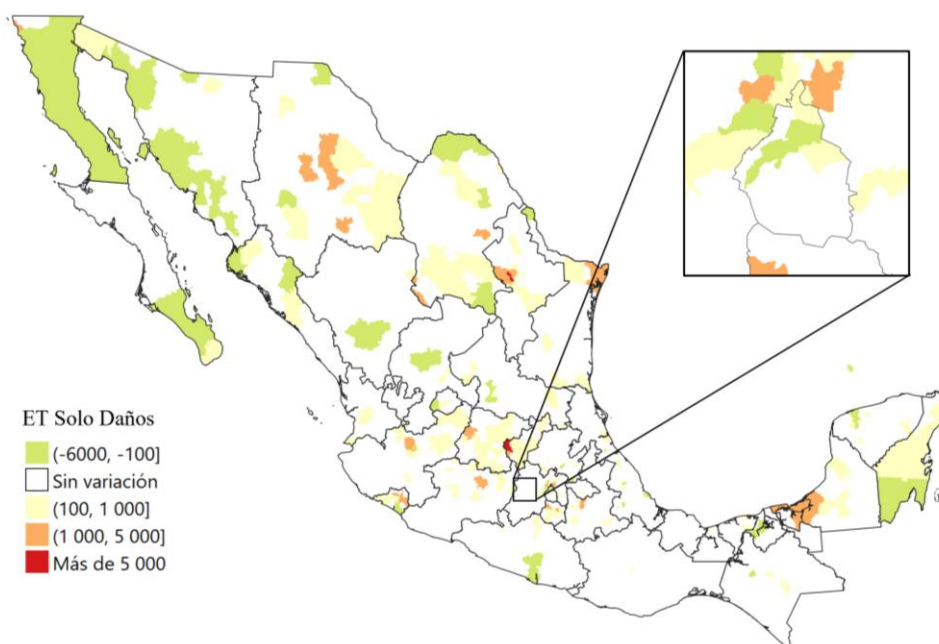
Mapas 2.48a y 2.10b. Distribución de los *ET-Solo daños*. ATUS municipal, 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Asimismo, los municipios que incrementaron más de 1,500 ET que solo produjeron daños son Monterrey, Querétaro, San Pedro Garza García, Ecatepec de Morelos, San Nicolás de los Garza, Puebla, Apodaca; mientras que en Badiraguato, Ahome, Ensenada, Mérida, Durango, Saltillo y Juárez disminuyeron en más de 1,000 esta clase de eventos.

Mapa 2.49. Variación de los *ET-Solo daños* en el periodo 1997-2018, ATUS municipal



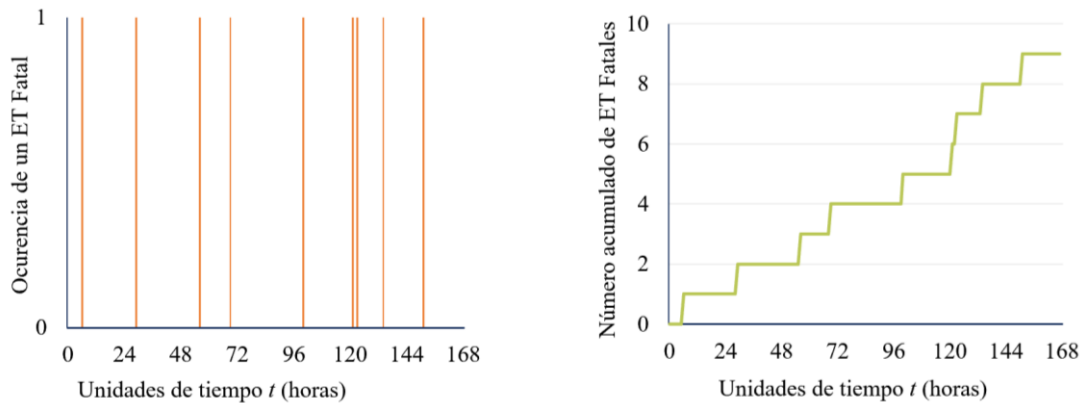
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de los procesos de conteo y de sus variables características de latencia, es posible analizar propiedades sobre las ST que no son discernibles desde los marcos deterministas y que permiten estimar y relativizar las medidas de riesgo, reconocer tendencias y realizar proyecciones en el tiempo, así como generar marcos comparativos a nivel estatal, municipal y de distintas escalas espaciales con el fin de reconocer a aquellas con la mayor intensidad o abatimiento del fenómeno a partir de acciones de gobierno.

Definición 31. El *tiempo de ocurrencia*, representado por la variable aleatoria $\mathcal{T}_{k+1}(\varepsilon, \tau)$ con $k = 1 \dots (n - 1)$ refiere al tiempo transcurrido para la ocurrencia de $ET_{k+1}(\varepsilon, \tau)$ desde que ocurrió el previo $ET_k(\varepsilon, \tau)$, acotado en el mismo espacio y tiempo, por lo que $\mathcal{T}_k(\varepsilon, \tau) \in [0, \infty) \forall k$ sobre una población delimitada espacial y temporalmente por τ y ε .

Las trayectorias típicas de este tipo de procesos permiten estimar la intensidad de las DT y reconocer patrones temporales y dinámicas espaciales, sobre todo si se cuenta con datos con alto nivel de granularidad. Para ilustrar las trayectorias típicas de un procesos generador de ET, se presenta la Figura 2.24 en la que se observan dos gráficas con los datos de un extracto de 7 días de la serie anual de *ET-Fatales-2018*, con cortes cada hora —168 horas en total. A la izquierda se muestra el momento t de ocurrencia de los ET; a la derecha, la línea escalonada indica el valor acumulado de ET a lo largo de la semana.

Figura 2.50. Extracto de serie de tiempo ATUS-2018 con número de fatalidades



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Además de ser sumamente útil para medir, las VA que modelan el tiempo tienen propiedades muy potentes para modelar a los procesos de conteo, para lo que a continuación se presentan más definiciones.

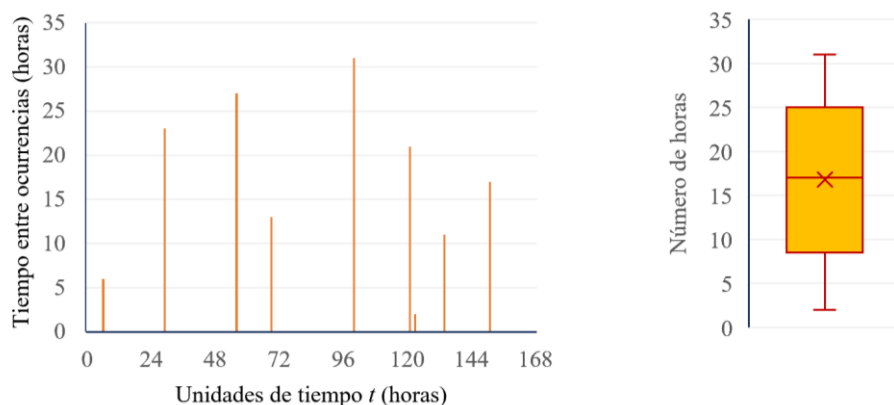
Definición 32. Sea $\{\mathcal{T}_{k+1}(\varepsilon, \tau)\}$ $k = 0, 1, \dots, n - 1$ una sucesión de variables aleatorias independientes cada una con distribución exponencial con parámetro $\lambda_\tau(\varepsilon)$. El *proceso de Poisson* de parámetro $\lambda_\tau(\varepsilon)$ es el proceso a tiempo continuo $\{\mathcal{N}_\tau(\varepsilon): \tau \geq 0\}$ tal que

$$\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) = \text{máx}\{n \geq 1: \mathcal{T}_\tau^1(\varepsilon) + \dots + \mathcal{T}_\tau^n(\varepsilon) \leq \tau\} \text{ con máx}\{\emptyset = 0\} \quad (2.19)$$

La ecuación 2.19 señala que la VA $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$ es el entero n máximo tal que la suma de los tiempos $\mathcal{T}_1(\varepsilon, \tau) + \dots + \mathcal{T}_n(\varepsilon, \tau)$ es menor o igual a τ , por lo que es equivalente a contar el número de eventos ocurridos hasta el momento τ en el espacio ε durante el periodo t . Con el mismo conjunto de datos del extracto de una semana del año 2018, es posible estimar la familia de tiempos entre ocurrencias $\{\mathcal{T}_{k+1}(\varepsilon, \tau)\}$ con $k = 0, 1, \dots, n - 1$, para complementar algunos detalles sobre la dinámica de los ET fatales durante este periodo de tiempo. A este tipo de procesos de conteo se les conocer como *Poisson homogéneo*.

La Figura 2.25 muestra los distintos tiempos entre ocurrencias, a la izquierda, el eje horizontal muestra el intervalo de la semana medido en horas y el vertical mide la realización de las variables $\{\mathcal{T}_{k+1}(2018)\}$ con $i = 1 \dots 9$; mientras que la derecha sintetiza su distribución en horas, que señala una tiempo mínimo de 2 y máximo 31 horas para registrar la ocurrencia de un ET con una media de 16.8 y desviación estándar de 9.1 horas.

Figura 2.51. Extracto de serie de tiempo ATUS-2018, con fecha y hora aproximada



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Definición 33. Para un proceso Poisson homogéneo $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$ en el que sus tiempos $\mathcal{T}_1(\varepsilon), \dots, \mathcal{T}_n(\varepsilon)$ siguen una ley exponencial con parámetro $\lambda_\tau(\varepsilon)$, se define la variable $\mathcal{W}_n(\varepsilon) = \mathcal{T}_1(\varepsilon) + \dots + \mathcal{T}_n(\varepsilon)$, $\mathcal{W}_n(\varepsilon) \in \mathbb{R}^+$ que indica el *instante en el que se observa la ocurrencia* del n -ésimo ET. Por su construcción, el evento $(\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) \geq n) = (\mathcal{W}_n(\varepsilon) \leq \tau)$, lo que se puede interpretar como: al instante τ han ocurrido por lo menos n eventos si, y solo si, el n -ésimo evento ocurrió antes de τ . Además, si los

tiempos entre ocurrencias efectivamente son exponenciales, entonces la distribución de $\mathcal{W}_n(\varepsilon)$ es del tipo Gamma($n, \lambda_\tau(\varepsilon)$), es decir

$$P(\mathcal{W}_\tau(\varepsilon) \leq \tau) = 1 - e^{-\lambda_\tau(\varepsilon)\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda_\tau(\varepsilon)\tau)^k}{k!} \quad (2.20)$$

Y como para cualquier $\tau > 0$ y para cada $n = 0, 1, \dots$

$$\begin{aligned} P(\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) = n) &= P(\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) \geq n) - P(\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) \geq n + 1) \\ &= P(\mathcal{W}_n(\varepsilon) \leq \tau) - P(\mathcal{W}_{n+1}(\varepsilon) \leq \tau) \\ &= e^{-\lambda_\tau(\varepsilon)\tau} \frac{(\lambda_\tau(\varepsilon)\tau)^n}{n!} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Que corresponde a la ecuación para estimar probabilidades que sigue una distribución de Poisson con parámetro $\lambda(\varepsilon, \tau)$.

Como consecuencia de las igualdades entre estas ecuaciones, la esperanza del proceso $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$ es $E[\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)] = \lambda_\tau(\varepsilon)\tau$ y $V[\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)] = \lambda_\tau(\varepsilon)\tau$, es decir, la cantidad $\lambda_\tau(\varepsilon)\tau$ es el promedio de observaciones o registros de ET en el intervalo $[0, t]$, lo que coincide ampliamente con la intuición: entre mayor sea el intervalo observado sobre un periodo de tiempo y espacios acotados, mayor será el promedio de observaciones realizadas y, desde luego, también mayor será la incertidumbre asociada al número de observaciones, ya que ambas estimaciones dependen de τ monótonamente pero no linealmente, debido a que solo afecta a la función del parámetro $\lambda_\tau(\varepsilon)$, precisamente el que modela la distribución de las probabilidades.

En este punto, es útil explicar que estos resultados son de enorme utilidad y profundo alcance práctico, ya que una de las características de la función de distribución de $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$ consiste en que es explícita para cualquier valor de $\tau \geq 0$; además, es posible hallar empíricamente sus parámetros para cualquier par de valores de τ y ε que cuenten con datos disponibles.

Una de las propiedades más generosas de este modelo es denominada ‘pérdida de memoria’, que en términos probabilísticos significa que si una $\mathcal{J}(\varepsilon)$ dada posee distribución exponencial con parámetro $\lambda_\tau(\varepsilon)$, para cualquier par de valores $\tau, s \geq 0$, se cumple la igualdad dada por la siguiente ecuación:

$$P(\mathcal{J}(\varepsilon) > \tau + s | \mathcal{J}(\varepsilon) > s) = P(\mathcal{J}(\varepsilon) > \tau) \quad (2.22)$$

La implicación de este resultado es que en todo momento hay discordancias de tránsito produciendo eventos y que, por tanto, las variables latentes, una vez registrado un ET, continúan produciendo ET bajo espacios de probabilidad equivalentes, por lo que es posible desarrollar las ecuaciones para realizar estimaciones explícitas en la forma siguiente:

$$P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon) = n) = \sum_{k=0}^{\infty} P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon) = n \mid \mathcal{N}_s(\varepsilon) = k) P(\mathcal{N}_s(\varepsilon) = k) \quad (2.23)$$

Obsérvese que esta expresión es muy útil porque permite desagregar periodos de tiempo dentro de un año o intervalo particular para el cual posiblemente no se tiene datos. Para lograrlo, basta analizar las probabilidades condicionales y observar que la probabilidad del evento $(\mathcal{N}_t(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon) = n)$ es la misma que la de $(\mathcal{N}_{t-s}(\varepsilon) = n)$, lo que se verifica mediante la siguiente igualdad:

$$\begin{aligned} P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon) = n) &= \sum_{k=0}^{\infty} P(\mathcal{N}_{t-s}(\varepsilon) = n) P(\mathcal{N}_s(\varepsilon) = k) \\ &= P(\mathcal{N}_{t-s}(\varepsilon) = n) \sum_{k=0}^{\infty} P(\mathcal{N}_s(\varepsilon) = k) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Estos resultados otorgan dos propiedades sustantivas para efectuar predicciones a lo largo del tiempo y ayuda a realizar predicciones más precisas mediante escenarios más realistas en distintas escalas de tiempo. De este modo, puede afirmarse que lo más relevante del resultado anterior no es que se confirme que el proceso de conteo $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$ se distribuye con ley de distribución Poisson $(\lambda_t(\varepsilon)t)$, sino que los incrementos $\mathcal{N}_t(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon)$ siguen la misma distribución de probabilidades con parámetro $(\lambda_t(\varepsilon)(t - s))$.

La segunda propiedad es aún más interesante, ya que la pérdida de memoria se asocia con la propiedad de Markov, es decir, cuando el proceso $\{\mathcal{N}_t(\varepsilon) : t \geq 0\}$ satisface las siguientes tres propiedades:

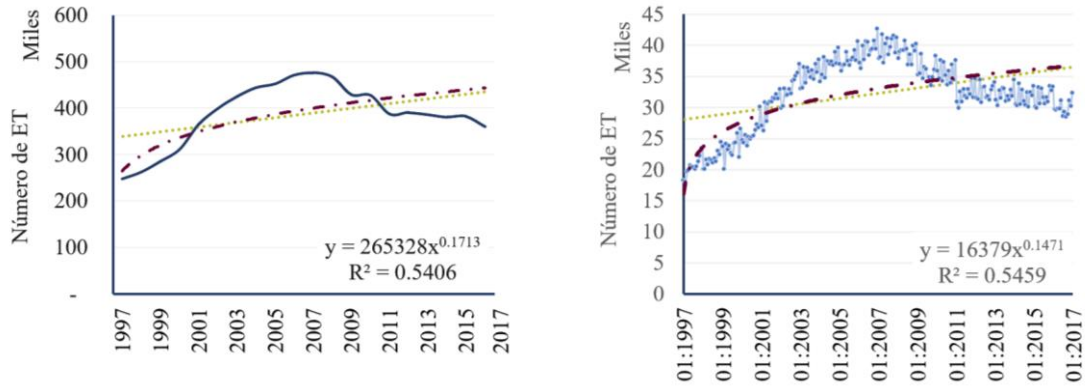
1. Es un proceso de Markov
2. Tiene incrementos independientes
3. Tiene incrementos estacionarios

Entonces, para cualquier $t, s \geq 0$ y enteros $0 \leq i \leq j$, las probabilidades de transición están dadas por

$$P(\mathcal{N}_{t+s}(\varepsilon) = j \mid \mathcal{N}_s(\varepsilon) = i) = e^{-\lambda_t(\varepsilon)t} \frac{(\lambda_t(\varepsilon)t)^{j-i}}{(j-i)!} \quad (2.25)$$

Lo anterior se puede interpretar de la siguiente manera: suponga que se ha registrado una colección de tiempos $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k$ y también una colección de estados del proceso de conteo de ET $0 \leq n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_k$, lo que se observa en la Figura 2.26 mediante la superposición de las mismas trayectorias dinámicas en diferentes escalas temporales.

Figura 2.52. Evolución de la frecuencia absoluta y tendencias de ATUS, 1997.01-2018.12



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

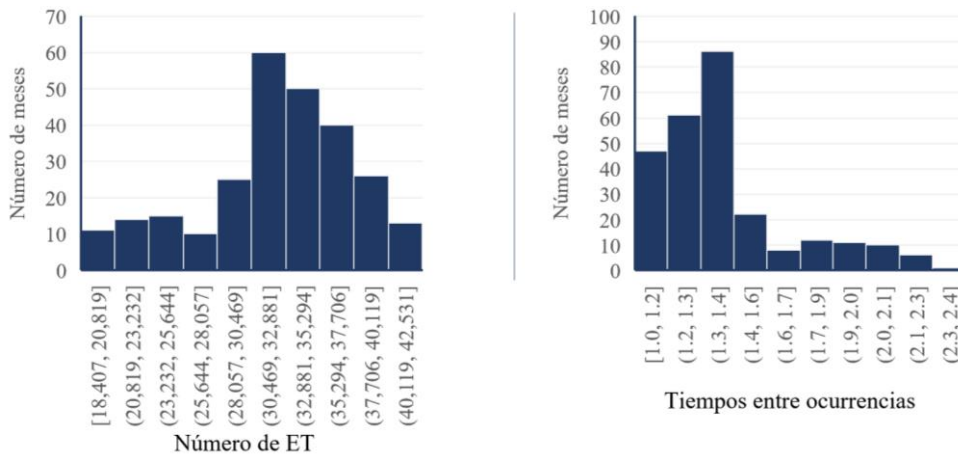
De acuerdo con lo anterior, en ambos casos se establece que al tiempo t_{k-1} ha habido n_{k-1} eventos de tránsito y, a partir del momento de esta última ocurrencia, se inicia un nuevo proceso de Poisson, de este modo, para que al tiempo t_k existan ya n_k ocurrencias, es necesario que en el intervalo de tiempo $(t_{k-1}, t_k]$ hayan ocurrido exactamente $(n_k - n_{k-1})$ eventos, cuya probabilidad viene dada por

$$P(\mathcal{N}_{t_k}(\varepsilon) - \mathcal{N}_{t_{k-1}}(\varepsilon) = n_k - n_{k-1}) \tag{2.26}$$

que coincide con la definición de la propiedad de Markov señalada previamente.

Ahora bien, para observar la aplicación práctica de la ecuación 2.26 basta analizar la Figura 2.27, que muestra dos histogramas: el de la derecha refiere a los ET registrados mensualmente por ATUS, el de la izquierda agrupa en intervalos los tiempos promedio entre ocurrencias para cada mes. De la gráfica previa (2.26) se deduce que la mayoría de los meses se registran entre 28,000 y 38,000 eventos, por lo que sus estimadores centrales son: media $\mu(ATUS) = 32,188$ y mediana $Me(ATUS) = 32,646$, lo que se modula con una desviación estándar $\sigma(ATUS) = 5,401$.

Figura 2.53. Histogramas de número y tiempos entre ocurrencias de ATUS, 1997.01-2018.12



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Asimismo, con el detalle de las observaciones de ATUS es posible obtener los siguientes estimadores: $\mu(ATUS) = \lambda(ATUS) = 1.41$, $Me(ATUS) = 1.35$ y $\sigma(ATUS) = 0.28$, es decir que, aproximadamente, cada minuto y medio ocurre un ET en zonas urbanas y suburbanas.

Un asunto de mayor importancia en la agregación de procesos es su comportamiento colectivo, algo que para los procesos de conteo se resuelve en la práctica mediante el uso de resultados teóricos muy potentes como los que a continuación se plantean.

Sea $\{\mathcal{N}_t(\varepsilon): t \geq 0\}$ un proceso de Poisson con parámetro $\lambda_t(\varepsilon)$ y sea \mathcal{S} una VA continua e independiente del proceso de conteo con soporte en el intervalo $(0, \infty)$. Para estas condiciones y para cualquier $t \geq 0$, el incremento $\mathcal{N}_s(\varepsilon) - \mathcal{N}_t(\varepsilon)$ se distribuye en forma Poisson($\lambda_t(\varepsilon)$) ya que dada una función de distribución $F_S(s)$, cualquier entero $k \geq 0$ se cumple:

$$\begin{aligned}
 P(\mathcal{N}_{s+t}(\varepsilon) - \mathcal{N}_t(\varepsilon) = k) &= \int_0^\infty P(\mathcal{N}_{s+t}(\varepsilon) - \mathcal{N}_t(\varepsilon) = k | \mathcal{S} = s) dF_S(s) \\
 &= \int_0^\infty P(\mathcal{N}_{s+t}(\varepsilon) - \mathcal{N}_s(\varepsilon) = k) dF_S(s) \\
 &= \int_0^\infty P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) = k) dF_S(s) \\
 &= P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) = k) \int_0^\infty dF_S(s) = P(\mathcal{N}_t(\varepsilon) = k) \tag{2.27}
 \end{aligned}$$

El resultado anterior, que puede parecer muy teórico en una primera revisión, es en realidad de aplicación sumamente práctica, en particular, a la hora de sumar o descomponer procesos Poisson independientes, ya que indica la forma precisa para estimar las probabilidades del nuevo proceso y la forma de su distribución.

Por ejemplo, sean $\{\mathcal{N}_t(\varepsilon; ATUS): t \geq 0\}$ el número de ET registrados en las zonas urbanas y suburbanas y $\{\mathcal{N}_t(\varepsilon; Comp): t \geq 0\}$ el registro de muertes totales por ET en el país, entonces, si los procesos tienen parámetros $\lambda_t(\varepsilon, ATUS)$ y $\lambda_t(\varepsilon, Comp)$ respectivamente, es de interés conocer el comportamiento del proceso $\{\mathcal{N}_t(\varepsilon; ATUS) + \mathcal{N}_t(\varepsilon; Comp): t \geq 0\}$ para generar indicadores comparables a través del tiempo y con otros países. De este modo, si $\mathcal{J}_1(\varepsilon), \dots, \mathcal{J}_n(\varepsilon)$ denotan los tiempos de arribo total y $\mathcal{N}_{[s,t]}$ denota la diferencia $\mathcal{N}_t(\varepsilon; ATUS + Comp) - \mathcal{N}_s(\varepsilon; ATUS + Comp) = \mathcal{N}_t(ATUS + Comp) - \mathcal{N}_s(ATUS + Comp)$, definido sobre ε y para $0 \leq s \leq t$.

De esta manera, para cualquier valor natural de n y para cualquier colección $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, el evento $(\mathcal{J}_1 > t_1, \dots, \mathcal{J}_n > t_n)$ es el registro conjunto y simultáneo de ambos procesos, el cual puede expresarse como

$$\begin{aligned} \left((\mathcal{N}_t(ATUS) + \mathcal{N}_t(Comp))_{[0,t_1]} = 0, (\mathcal{N}_t(ATUS) + \mathcal{N}_t(Comp))_{[T_1, T_1+t_2]} \right. \\ \left. = 0, \dots, (\mathcal{N}_t(ATUS) + \mathcal{N}_t(Comp))_{[T_{n-1}, T_{n-1}+t_n]} = 0 \right) \end{aligned}$$

Que equivale a escribir

$$\begin{aligned} & (\mathcal{N}_t(ATUS)_{[0,t_1]} = 0) \cap (\mathcal{N}_t(Comp)_{[0,t_1]} = 0) \\ & \bigcap (\mathcal{N}_t(ATUS)_{[T_1, T_1+t_2]} = 0) \cap (\mathcal{N}_t(Comp)_{[T_1, T_1+t_2]} = 0) \\ & \quad \dots \\ & \bigcap (\mathcal{N}_t(ATUS)_{[T_{n-1}, T_{n-1}+t_n]} = 0) \cap (\mathcal{N}_t(Comp)_{[T_{n-1}, T_{n-1}+t_n]} = 0) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Lo que se convierte en el producto de las probabilidades de los tramos debido a la independencia de los procesos y las propiedades de incrementos independientes de cada caso

$$\begin{aligned} & P(\mathcal{N}_t(ATUS)_{[0,t_1]} = 0) P(\mathcal{N}_t(Comp)_{[0,t_1]} = 0) \\ & P(\mathcal{N}_t(ATUS)_{[T_1, T_1+t_2]} = 0) P(\mathcal{N}_t(Comp)_{[T_1, T_1+t_2]} = 0) \\ & \quad \dots \\ & P(\mathcal{N}_t(ATUS)_{[T_{n-1}, T_{n-1}+t_n]} = 0) P(\mathcal{N}_t(Comp)_{[T_{n-1}, T_{n-1}+t_n]} = 0) \end{aligned}$$

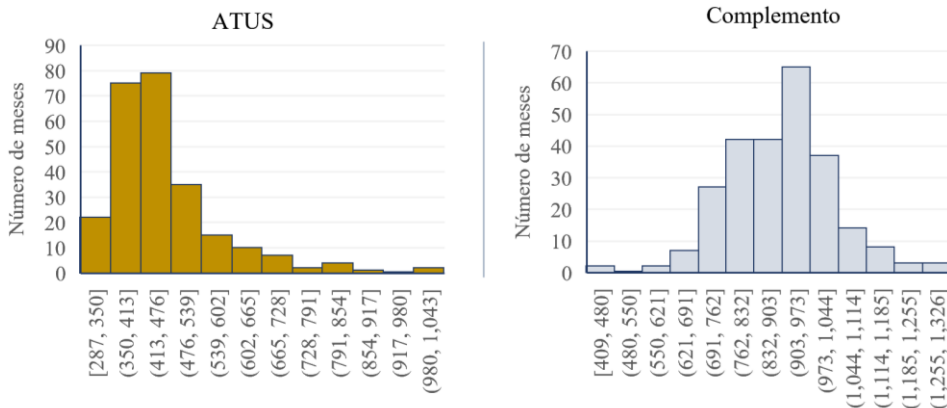
A partir de lo anterior, se deduce que la probabilidad del evento se estima de la siguiente manera

$$P(\mathcal{J}_1(\varepsilon) > t_1, \dots, \mathcal{J}_n(\varepsilon) > t_n) = e^{-(\lambda_t(ATUS) + \lambda_t(ATUS))t_1} \dots e^{-(\lambda_t(ATUS) + \lambda_t(ATUS))t_n} \quad (2.29)$$

En donde $\mathcal{J}_1, \mathcal{J}_2, \dots, \mathcal{J}_n$ son independientes y se distribuyen exponencialmente con parámetros de intensidad $\lambda_{ATUS} + \lambda_{Comp}$.

En la Figura 2.28 se muestran los histogramas de ambos procesos.

Figura 2.54. Histogramas de número de ocurrencias ATUS y Complemento de ET, 1997.01-2018.12



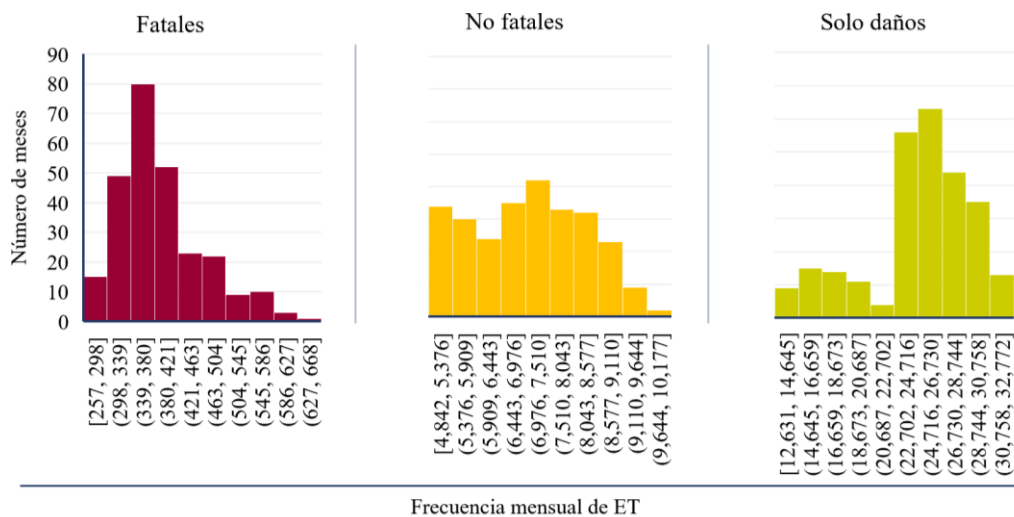
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, en las zonas urbanas la mayoría de los meses se registran entre 350 y 476 defunciones por ET, lo que se observa en la brecha entre la media de $\mu_t = 462$ y la mediana $Me_t = 431$, acompañada de una desviación estándar de $\sigma_t = 113$ que produce un decaimiento exponencial para cifras mayores, por lo que en el ámbito de ATUS es poco frecuente observar más de 1,000 defunciones mensuales por ET.

Por lo contrario, en el complemento de las zonas urbanas y suburbanas predominan los meses con un número de defunciones entre 762 y 1,044, por lo que los momentos centrales son muy cercanos entre sí — $\mu_t = 896$ y la mediana $Me_t = 906$ — y la varianza es mayor que en los registros de ATUS ($\sigma_t = 134$), además, dado que las desviaciones a la media y el decaimiento exponencial son simétricos, se deduce que el proceso tiene una tendencia estable con la presencia de elementos estacionales, como se verá más adelante.

De acuerdo con la ecuación 2.29, es posible reconstruir el proceso generador de defunciones a nivel nacional a partir de los tiempos observados, o bien, obtener otro tipo de descomposiciones con base en sus probabilidades. Por ejemplo, la descomposición en las tres clases de consecuencias muestra que éstas poseen distintas formas de distribución, no obstante, su agregación reconstruye la distribución nacional.

Figura 2.55. Histogramas de frecuencias de ocurrencias de ET por clase, 1997.01-2018.12



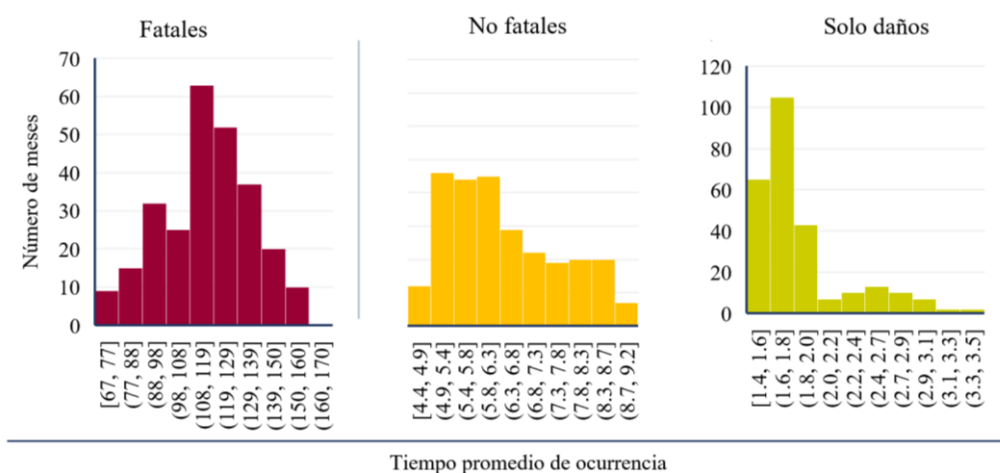
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

La Figura 2.29 muestra la distribución de las tres categorías de ET. Como puede observarse, la distribución de los *ET-Fatales* está sesgada a la izquierda con frecuencias concentradas entre 298 y 421 ET y decaimiento exponencial. Los *ET-No fatales* aparecen sin moda dominante y con una densidad homogénea que inicia desde el ínfimo (4,842) hasta acumular el 90% de los eventos en el

valor 8,577 y decaer velozmente en los últimos tres intervalos. Por su parte, los *ET-Solo daños* exhiben dos grupos de ET con sus respectivas modas, el primero en el intervalo (12,631-22,702) con baja frecuencia y el segundo en el intervalo (22,702-32,772) con decaimiento acelerado.

En la Figura 2.30 se observan los tiempos promedio de ocurrencia de las tres clases de ET. Los *ET-Fatales* suceden en promedio casi cada dos horas (116 minutos) con una desviación estándar de 20 minutos y su distribución es simétrica. Los *ET-No fatales* ocurren en promedio cada 6.4 minutos con una dominación a la tiempos más breves mientras que los *ET-Solo daños* suceden cada 1.8 minutos en promedio siendo el intervalo (1.4-1.8) el más frecuente, por lo cual dominan estadísticamente la distribución nacional de los ET.

Figura 2.56. Histogramas de tiempos entre ocurrencias de ET por clase, 1997.01-2018.12

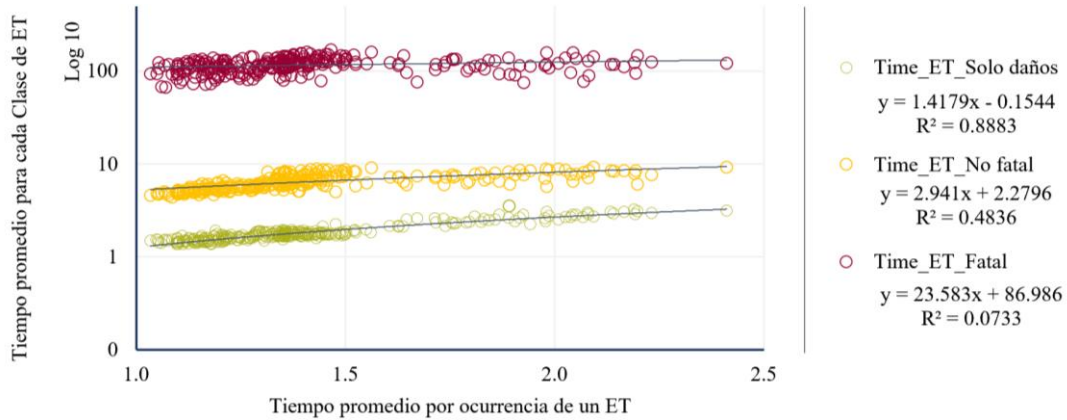


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

También es posible reconocer el influjo y aporte de los procesos que generan mortalidad y morbilidad para separarlo de los registros que solo producen daños materiales, así como su relación con la distribución de los ET a lo largo del tiempo.

En la Figura 2.31 se observa la estimación vía MCO de la relación lineal entre el tiempo promedio para el total de ET —eje horizontal— y el tiempo promedio por ocurrencia de ET para cada clase —eje vertical—. Los coeficientes de determinación señalan que las variaciones en la frecuencia de los *ET-Fatales* tienen una dinámica completamente diferente a la de los ET ($R^2=0.0733$, $p<0.001$), mientras que existe una estrecha correlación entre los *ET-Totales* y los *ET-No fatales* ($R^2=0.4836$, $p<0.001$) y los *ET-Solo daños* ($R^2=0.8883$, $p<0.001$), lo que brinda elementos para revisar con mayor detalle los procesos de registro de cada clase con el fin de evitar sesgos sistemáticos e interpretaciones equivocadas.

Figura 2.57. Evolución del tiempo promedio entre ocurrencias, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

2.3 Evolución temporal de los ET

A partir de las definiciones anteriores, es posible analizar los datos históricos de México en diversas escalas. Desde luego, es útil comenzar con la nacional y revisar su dinámica para luego realizar los modelos estatales. Una forma muy útil de estudiar la evolución de las series de tiempo consiste en comparar las *variaciones* respecto a un año base, lo cual se logra mediante la representación de la serie:

$$\begin{aligned}
 & \frac{(X_{t_0} - X_{t_0+1})}{X_{t_0}}, \frac{(X_{t_0} - X_{t_0+2})}{X_{t_0}}, \dots, \frac{(X_{t_0} - X_{t_0+n})}{X_{t_0}} = \\
 & = \frac{(BX_{t_0+1} - X_{t_0+1})}{X_{t_0}}, \frac{(B^2X_{t_0+2} - X_{t_0+2})}{X_{t_0}}, \dots, \frac{(B^nX_{t_0+n} - X_{t_0+n})}{X_{t_0}} \\
 & = -\frac{1}{X_{t_0}} \left((1-B)X_{t_0+1}, (1-B^2)X_{t_0+2}, \dots, (1-B^n)X_{t_0+n} \right) \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

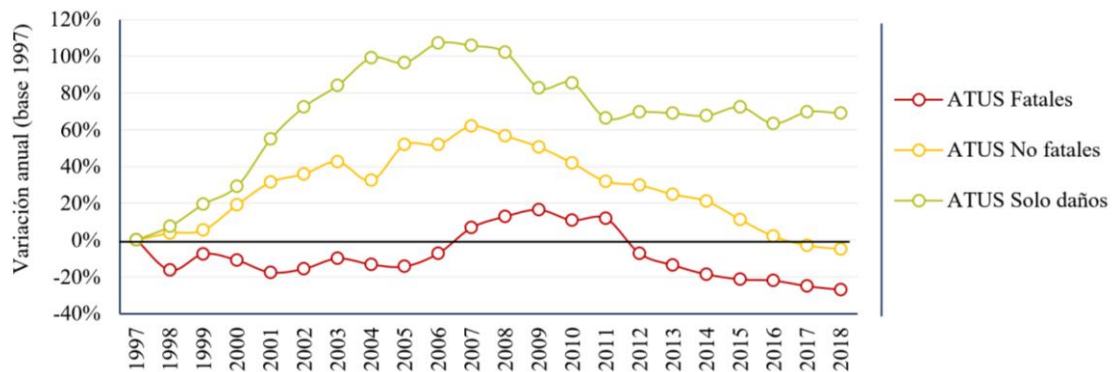
En donde el análisis de sus tendencias, periodos y otros tipos de patrones temporales a través de las variaciones respecto al año base dado por

$$\left(\frac{X_{t_0+1}}{X_{t_0}}, \frac{X_{t_0+2}}{X_{t_0}}, \dots, \frac{X_{t_0+n}}{X_{t_0}} \right) = \left(\frac{X_{t_0+1}}{BX_{t_0+1}}, \frac{X_{t_0+2}}{B^2X_{t_0+2}}, \dots, \frac{X_{t_0+n}}{B^nX_{t_0+n}} \right) \quad (2.31)$$

En la Figura 2.32 se muestra que la veloz evolución de los ET en los primeros años del milenio provocará un aumento de 92% respecto a la década previa y que, a pesar de su gradual disminución posterior, los 365,167 ET registrados en 2018 aún representen 47.2% más que en 1997. Por su parte, los *ET-No fatales* muestran una tendencia creciente desde 1997 hasta 2007, acumulando más de 60% respecto al año base, decreciendo después sostenidamente hasta reducir en 5% el número inicial.

En lo que respecta a los *ET-Fatales*, existe una dinámica distinta: 2006 es el primer año que registra un aumento respecto 1997, se mantiene así hasta 2011 y luego desciende gradualmente a partir del año 2012, hasta reducir 26.9% la cantidad de eventos en 2018 respecto a 20 años atrás. Una de las conclusiones derivadas de estas estimaciones es que, si bien el número de eventos que solo produjeron daños han aumentado gradualmente, los eventos fatales y no fatales han decrecido significativamente.

Figura 2.58. Evolución de la variación anual de ATUS, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para obtener nuevas informaciones sobre estos datos, un poco de álgebra hace posible el diseño de arreglos de las mismas series que muestren aspectos diferenciales en la producción de brechas. Por ejemplo:

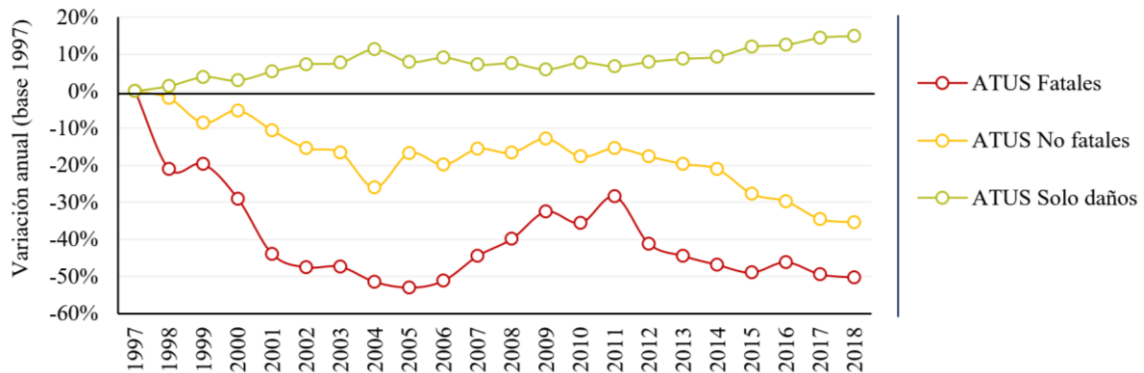
$$\begin{aligned}
 & \nabla \left(\frac{X_{t_0} - X_{t_0+1}}{X_{t_0}} \right), \nabla \left(\frac{X_{t_0} - X_{t_0+2}}{X_{t_0}} \right), \dots, \nabla \left(\frac{X_{t_0} - X_{t_0+n}}{X_{t_0}} \right) = \\
 & = \nabla \left(\frac{(B X_{t_0+1} - X_{t_0+1})}{X_{t_0}} \right), \nabla \left(\frac{(B^2 X_{t_0+2} - X_{t_0+2})}{X_{t_0}} \right), \dots, \nabla \left(\frac{(B^n X_{t_0+n} - X_{t_0+n})}{X_{t_0}} \right) \\
 & = -\frac{1}{X_{t_0}} \left((1-B)X_{t_0+1}, (1-B^2)X_{t_0+2}, \dots, (1-B^n)X_{t_0+n} \right) \quad (2.32)
 \end{aligned}$$

Ecuación que refiere a la posibilidad de obtener las variaciones proporcionales de una serie como un método recursivo que muestre la magnitud de la aceleración de las variaciones a través de los años, brindando información muy útil y fácilmente interpretable debido a que los resultados de las estimaciones se presentan en valores porcentuales.

En la Figura 2.33 se observan las variaciones en la proporción de cada clase de ATUS respecto al año base 1997, lo que señala cómo los *ET-Solo daños* aumentan sostenidamente todos los años para incrementar su presencia en 15 puntos porcentuales para el 2018, mientras que los *ET-No fatales* descienden 35% de manera complementaria para pasar de 26.8% a 17.3%. Por su parte, los *ET-Fatales* descienden en forma abrupta en los primeros años (-50%), luego asciende sostenidamente hasta 2011

a 1.5% y finalmente vuelve a disminuir a 1.0%, menos de la mitad del 2.1% que representaba en 1997, mostrando un comportamiento errático en el periodo de mayor número absoluto de eventos.

Figura 2.59. Evolución de la variación en la proporción de cada clase de ATUS. Nacional, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otra forma de analizar los cambios en las series de tiempo es la estimación de las variaciones interanuales de los ET en su forma proporcional, lo que permite el análisis de tendencias con base en la colección de los siguientes valores:

$$\frac{(X_{t_0} - X_{t_0+1})}{X_{t_0}}, \frac{(X_{t_1} - X_{t_0+2})}{X_{t_1}}, \dots, \frac{(X_{t_0+n-1} - X_{t_0+n})}{X_{t_0+n-1}} \quad (2.33)$$

La ecuación 2.33 permite contrastar la magnitud de los cambios a lo largo del tiempo y en el espacio y obtener tendencias sobre la evolución de la serie. En este punto, un fenómeno de especial interés es el grado de asociación entre la frecuencia total de ET y los tipos de consecuencia. Para estimar el grado de asociación lineal entre estas variables aleatorias, se puede emplear el método de *Mínimos Cuadrados Ordinarios* (MCO) para cada par de variables y luego estimar el modelo multivariado que integre más componentes explicativos.

En la Figura 2.34 se muestran las rectas de regresión entre la Frecuencia total de las ocurrencias históricas de $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$ y cada uno de las consecuencias $\mathcal{N}_t(ZUS, Fatales)$, $\mathcal{N}_t(ZUS, No fatales)$ y $\mathcal{N}_t(ZUS, Solo daños)$, dadas por $n_t(ZUS, Fatales)$, $n_t(ZUS, No fatales)$ y $n_t(ZUS, Solo daños)$.

Como se ha podido corroborar a lo largo del capítulo, la descripción de las características de los ET mediante estimaciones estadísticas permite conocer propiedades muy valiosas sobre su magnitud y distribución. En este sentido, la modelación del tiempo y el espacio es un asunto vital, sobre todo porque los ámbitos de gestión ocurren en unidades bien delimitadas sobre las que es posible plantear escenarios y calcular distintas probabilidad de ocurrencia, las cuales pueden modificarse dinámicamente ante diversas intervenciones.

Figura 2.60. Evolución de las variaciones en la frecuencia de ATUS. Nacional, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

2.3.1 Dinámica de los ATUS

Dado que los conjuntos de datos poseen diversos horizontes temporales y tipos de desagregación espacial, uno de los objetivos generales de esta investigación es establecer las ecuaciones que permiten estandarizar los procesos de integración de los conjuntos informativos y unificar algunos métodos para realizar proyecciones con errores de medida bien definidos. Por ello, a partir de las definiciones establecidas, es posible ampliar el conjunto de resultados mediante técnicas econométricas que permitan impulsar estimaciones puntuales sobre la probable evolución de los ET en sus diversas categorías, primero respecto al parámetro *tiempo* y más adelante, con algunas adecuaciones, respecto al *espacio*, para lo cual se definen los procesos que serán empleados en el análisis de las Series de Tiempo generadas por la ocurrencia de ET.

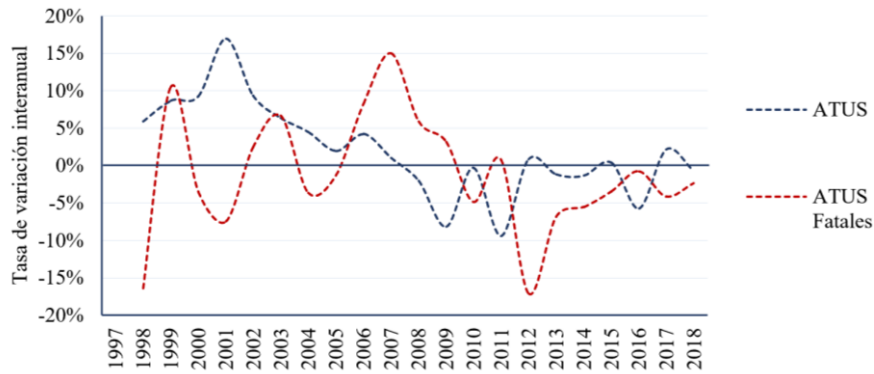
ET Fatales

Como se ha dicho, las variaciones interanuales señalan cambios en el corto plazo y permiten comparar impactos en las series de tiempo. En la Figura 2.35 se observa que las variaciones en los *ET-Fatales* oscilan alrededor de cero por ciento hasta que en 2008 comienza a decrecer por algunos años para, posteriormente, volver a cercarse a cero a partir de 2016.

También es fácil observar que los *ET-Fatales* han tenido una tendencia decreciente que oscila en torno al 39.2%, en 2018 y representaron 1.1%, lo que implica una reducción de 46% frente al 2.1% de 1997. Como en 1997 los *ET-No fatales* representaron 26.8%, su tendencia a disminuir promedia 14.5 puntos y en 2018 alcanzó 18.8% del total, 30% menos que al inicio de la serie. Desde luego, la reducción de los *ET-Fatales* y *ET-No fatales* implica que aquellos que solo produjeron daños aumentaran su

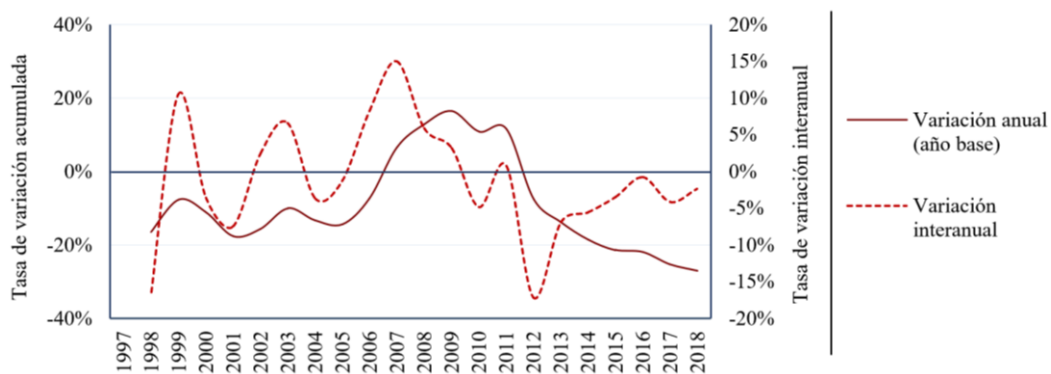
participación en 13%, lo que lo representa 80% del total y que, combinado con el aumento absoluto del número de eventos, supone 63% más accidentes que solo involucran daños materiales.

Figura 2.61. Evolución de las variaciones interanuales de ATUS y *ATUS-Fatales*, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Figura 2.62. Evolución de las variaciones de ATUS y *ATUS-Fatales*, 1997-2018

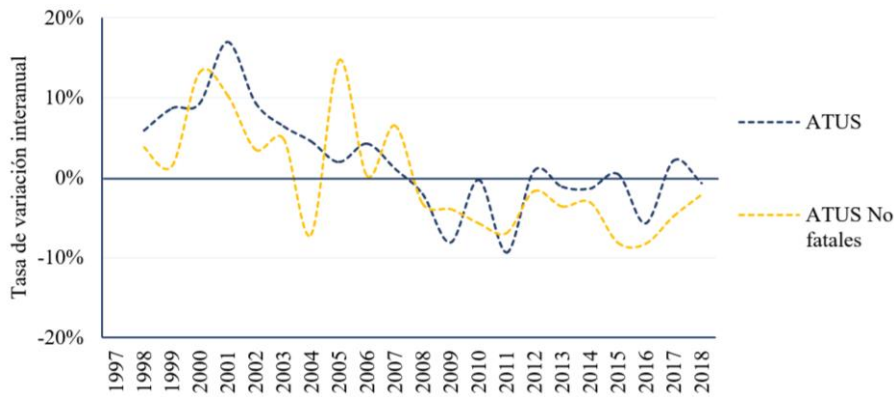


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

ET No Fatales

Como puede observarse en la Figura 2.37, las tendencias de la evolución de las variaciones interanuales de los ET y los *ET-Fatales* son decrecientes y sus oscilaciones son similares después del año 2005, siendo mucho más marcadas las caídas de los *ET-No fatales* que los *ET-Totales*, debido posiblemente a las brechas de calidad en los sistemas de registro estatales, lo que se refleja en sesgo errático en los primeros años. Por su parte, aunque las cifras de los *ET-No fatales* aumentaron en el periodo 1997-2007, el descenso posterior los ubica en 2018 en valores absolutos similares a 1997, lo que se traduce en una reducción de 35% respecto a su representación en el total.

Figura 2.63. Evolución de las variaciones interanuales de ATUS y ATUS-No fatales, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como se ha escrito antes, la dinámica de los *ET-No fatales* es cercana a la de los *ET-Fatales*, pero con un aumento muy pronunciado en la variación respecto al años base en el periodo 2004-2010 que presenta su máximo en 2007 y corresponde a la frecuencia de los ET. Sin embargo, el comportamiento oscilatorio hasta llegar al ‘pico’ de 2005 no presenta una relación evidente con las otras clases de ET y es hasta después de este año que se observa un descenso con oscilaciones que se asocian con el comportamiento de las otras series en su disminución sostenida hasta alcanzar una disminución de 20% respecto al año anterior.

Figura 2.64. Evolución de las variaciones de ATUS y ATUS-No fatales, 1997-2018



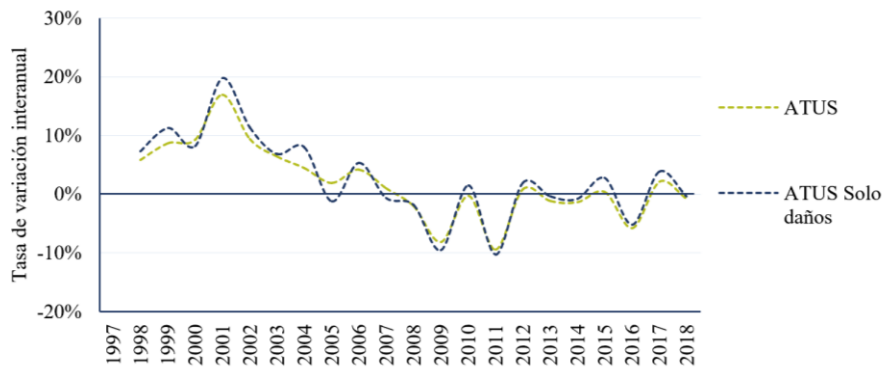
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

ET Solo Daños

En la Figura 2.39 se muestra cómo las variaciones de los *ET-Totales* y *ET-Solo daños* son concurrentes y que la frecuencia de aquellos que son solo daños es un poco más contrastante, lo que probablemente se debe a una volatilidad mayor en el registro, dando evidencias de un proceso de reversión de la tendencia consistente con los ET totales que puede explicarse como sigue: dado que la evolución de

las series es la misma para ambos modos de variación, la variación conjunta ofrece la posibilidad de identificar dos fenómenos distintos basados en el inicio del cambio de tendencia y la consolidación de ese cambio.

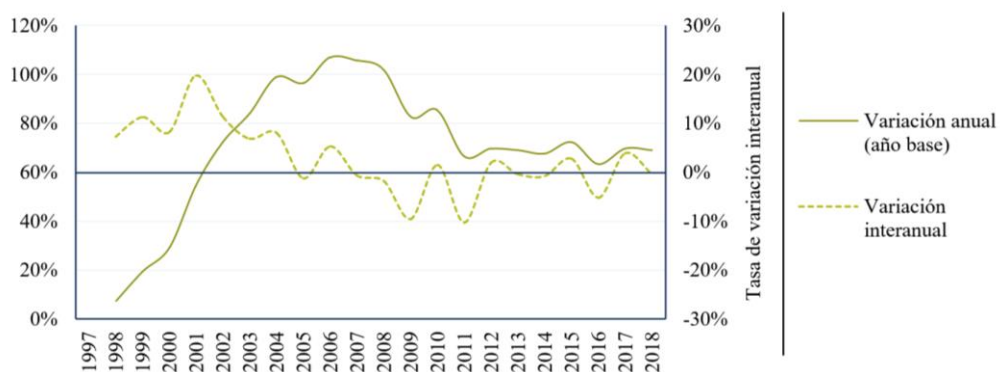
Figura 2.39. Evolución de las variaciones interanuales de ATUS y ATUS-Solo daños, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por su parte, en la Figura 3.40 se observa que la clase de *ET-Solo daños* aumentó de manera pronunciada durante el periodo 1997-2009 hasta alcanzar 107% de los valores iniciales, después de lo cual descendió para oscilar alrededor del 70%, lo que implica una presencia 15% mayor en el total de ET observados en 2018. Dado que el 76.4% de los eventos son *ET-Solo daños*, la evolución de las series es muy similar a la exhibida por el número total de ET, que muestra un proceso ascendente hasta el año 2007, una meseta de dos años y luego un descenso sostenido hasta alcanzar el 60% de las cifras registradas en 1997; por lo que las variaciones interanuales muestran el mismo fenómeno ya descrito: después del aumento hasta 2002, comienzan a descender hasta alcanzar variaciones negativas en 2008.

Figura 2.65. Evolución de las variaciones de ATUS y ATUS-Solo daños, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

2.3.2 Proyecciones sobre ET

Extender las series de tiempo implica extraer información sobre los componentes de las series de tiempo con el fin de utilizar los valores históricos para pronosticar valores futuros con base en las mediciones disponibles. Existen dos variables estructurales para definir la proyección de los ET: el período, del que es inherente el nivel de agregación, y el horizonte, medido en períodos equidistantes. Por supuesto, para impulsar este ejercicio, es necesario establecer algunas definiciones conceptuales.

Definición 34. Un PE a tiempo discreto $\{X_t: t \in T\}$ es *puramente aleatorio* si consiste en una secuencia de VA que son independientes entre ellas e idénticamente distribuidas. Lo que implica que las variables poseen media y varianza constantes, $\mu_t = \mu$ y $\sigma_t^2 = \sigma$, $\forall t \in T$. Por lo que el supuesto de independencia implica que

$$\gamma_{t,t+\tau} = Cov(X_t, X_{t+\tau}) = \begin{cases} \sigma_t^2 & \text{si } \tau = 0 \\ 0 & \text{si } \tau = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (2.34)$$

Es decir, los valores de la serie no covarían entre ellos y el coeficiente de autocorrelación está dado por

$$\rho\gamma_{t,t+\tau} = Corr(X_t, X_{t+\tau}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau = 0 \\ 0 & \text{si } \tau = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (2.35)$$

Debido a que la media y la varianza no dependen del tiempo, este tipo de procesos tienen muchas propiedades, quizá la más relevante es que es un proceso estacionario de segundo orden —debido a que el segundo momento también es invariante. A este tipo de PE se les conoce también como ruido blanco y, aunque no es frecuente observarlos en su estado puro, uno de sus principales usos reside en ‘removerlo’ de series más complejas para lograr identificar su estructura.

Definición 35. Una *caminata aleatoria* es un PE $\{X_t: t \in T\}$ a tiempo discreto y puramente aleatorio con media $\mu_t = \mu$ y $\sigma_t^2 = \sigma$, $\forall t \in T$, para el cual $X_t = X_{t-1} + Z_t$.

$$\text{Si } X_0 = 0 \Rightarrow X_t = Z_1 + X_0 = \sum_{i=1}^t Z_i \quad (2.36)$$

Por lo que $E[X_t] = t\mu$ y $Var[X_t] = t\sigma^2$, por lo cual se concluye que el proceso no es estacionario.

En este punto es importante hacer notar que si al proceso X_t se le aplica el operador diferencias, se obtiene un nuevo proceso $\nabla X_t = X_t - X_{t-1} = Z_t$ que sí es estacionario. Este tipo de series es muy útil para detectar verdaderos cambios de nivel y no solo variaciones aleatorias en las magnitudes de los ET, ya que el valor actual de cualquier variable con tendencia depende profundamente de su valor inmediato más una perturbación que puede ser aleatoria, o no. Como puede notarse, investigar la

naturaleza de la perturbación, una vez controlada la tendencia, equivale a conocer si el fenómeno ha modificado su comportamiento.

Medias móviles

Definición 36. Un PE $\{Z_t: t \in T\}$ puramente aleatorio con media μ y varianza σ^2 es de *Medias Móviles* de orden q , denotado MA(q), si

$$X_t = \beta_0 Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_q Z_{t-q} \quad (2.37)$$

Con $\{\beta_i\}$ constantes tal que, bajo una transformación para cambiar de escala, $\beta_0 = 1$, $E[X_t] = 0$ y

$$\text{Var}[X_t] = \sigma_Z^2 \sum_{i=0}^q \beta_i^2 \quad (2.38)$$

$$\gamma(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau > q \\ \sigma_Z^2 \sum_{i=0}^{q-\tau} \beta_i \beta_{i+\tau} & \text{si } \tau = 0, 1, \dots, q \\ \gamma(-\tau) & \text{si } \tau < 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

Y función de autocorrelación

$$\rho(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau > q \\ \frac{\sum_{i=0}^{q-\tau} \beta_i \beta_{i+\tau}}{\sum_{i=0}^q \beta_i^2} & \text{si } \tau = 0, 1, \dots, q \\ \rho(-\tau) & \text{si } \tau < 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

Como $\gamma(\tau)$ no depende de t y la media es constante, este proceso es estacionario de segundo orden. De este modo, si las VA de la familia $\{Z_t: t \in T\}$ se distribuyen de manera gaussiana, entonces las VA de la familia $\{X_t: t \in T\}$ también lo hacen, lo que garantiza la presencia de un proceso estrictamente estacionario. Además, no es necesario hacer ninguna restricción sobre los coeficientes $\{\beta_i\}$ para un modelo MA de orden finito, no obstante, es deseable imponer restricciones sobre ellos para asegurar algunas propiedades métricas, especialmente la *invertibilidad*.

Procesos autoregresivos

Definición 37. Un PE $\{Z_t: t \in T\}$ puramente aleatorio con media μ y varianza σ^2 es un *proceso autoregresivo* de orden p , denotado AR(p), si

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t \quad (2.41)$$

Lo que se asemeja en estructura a la regresión lineal múltiple en donde los regresores son la misma variable en periodos previos. En este punto se puede notar fácilmente que el modelo AR(1) coincide exactamente con un proceso de Markov $X_t = \alpha X_{t-1} + Z_t$, lo cual se puede reescribir como

$$\begin{aligned}
X_t &= \alpha(\alpha X_{t-1} + Z_{t-1}) + Z_t \\
X_t &= \alpha^2(\alpha X_{t-3} + Z_{t-2}) + \alpha Z_{t-1} + Z_t
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Procedimiento que puede repetirse en forma recursiva para obtener un proceso MA de orden infinito

$$X_t = Z_t + \alpha Z_{t-1} + \alpha^2 Z_{t-2} + \dots \text{ con } -1 < \alpha < 1$$

Como puede esperarse, que un proceso AR pueda escribirse como un MA implica un proceso dual para realizar estimaciones equivalentes y la posibilidad de emplear el operador retardo en situaciones diversas, por ejemplo $(1 - \alpha B)X_t = Z_t$ por lo que

$$\begin{aligned}
X_t &= Z_t / (1 - \alpha B) \\
&= (1 + \alpha B + \alpha^2 B^2 + \dots) Z_t \\
&= Z_t + \alpha Z_{t-1} + \alpha^2 Z_{t-2} + \dots
\end{aligned}$$

De lo que se desprende que $E[X_t]=0$ y, si con $-1 < \alpha < 1$, entonces se garantiza varianza finita dada por $\sigma_X^2 = \text{Var}[X_t] = \sigma_Z^2 / (1 - \alpha^2)$ y función de autocovarianza dada por

$$\gamma(\tau) = \left(\sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i Z_{t-i} \right) \left(\sum_{j=0}^{\infty} \alpha^j Z_{t+\tau-j} \right) \tag{2.43}$$

$$= \sigma_Z^2 \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i \alpha^{\tau+i} = \frac{\alpha^\tau \sigma_Z^2}{1 - \alpha^2} = \alpha^\tau \sigma_X^2 \text{ para } \tau > 0 \text{ y } |\alpha| < 1 \tag{2.44}$$

Que cuando $\tau < 0$, $\gamma(\tau) = \gamma(-\tau)$, una función independiente del tiempo t , lo que lo convierte en un AR(1) estacionario de segundo con función de autocorrelación $\rho(\tau) = \alpha^\tau = \alpha^{|\tau|}$ para $\tau = 0, 1, 2, \dots$, por ser una función par.

Procesos SARIMA(p,q,d,s)

Para dar mayor nitidez en la representación de las ST es posible generar un proceso mixto con ambos modelos para obtener un *proceso autoregresivo de medias móviles* ARMA(p,q) mediante la ecuación

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_q Z_{t-q} \tag{2.45}$$

O en forma equivalente

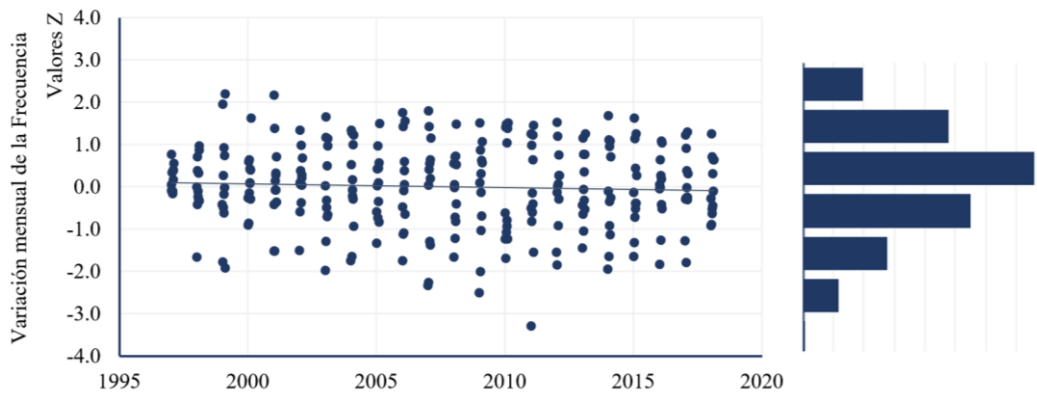
$$\begin{aligned}
X_t &= \sum_{i=0}^p \alpha_i X_{t-i} + Z_t + \sum_{j=0}^q \beta_j Z_{t-j} \\
\alpha(B)X_t &= \beta(B)Z_t
\end{aligned} \tag{2.46}$$

A partir de la ecuación 2.46 se deduce que $X_t = \frac{\beta(B)}{\alpha(B)} Z_t$, lo que permite operar con ambas series X_t y Z_t para mejorar la flexibilidad, especialmente cuando es necesario realizar aproximaciones o cuando

las series no son estacionarias, pero sus tendencias se comportaran como un polinomio de grado k , lo que permitiría volverlas estacionarias mediante el proceso de diferenciación del mismo orden k $\nabla^k X_t$. De este modo, un proceso X_t es modelo ARMA integrado ARIMA(p, d, q) si $\nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t$ es un modelo ARMA(p, q) y por tanto, se puede escribir como $\alpha(B)(1 - B)^d X_t = \beta(B)Z_t$, algo muy útil para modelar datos con tendencia.

Cuando se obtienen datos como resultado de efectuar diferencias, es común que se remuevan los componentes de ruido aleatorio, por lo que, si no existen otro tipo de estructuras de ruido, se puede obtener una distribución simétrica unimodal que ayude a implementar técnicas econométricas estándar, como es el caso del número de ET que se observa en la Figura 2.41.

Figura 2.66. Evolución de la variación estandarizada de la frecuencia de ET. Nacional 1997-2018

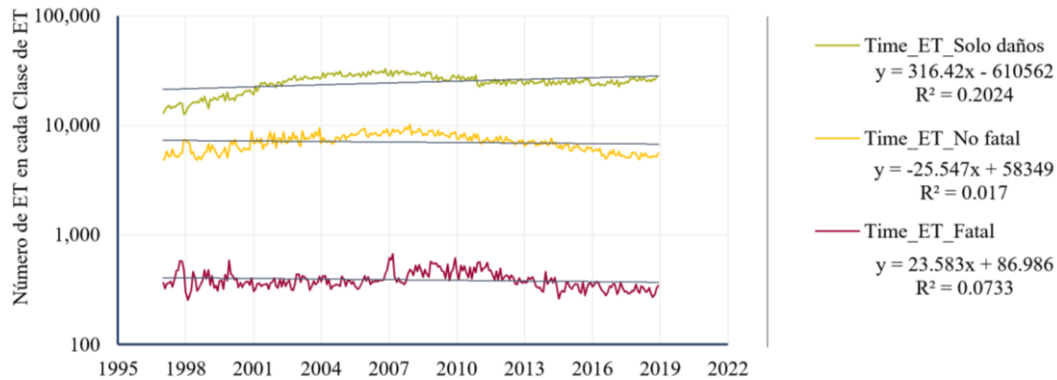


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por último, para remover posibles tendencias estacionales debidas a volatilidades o periodos de tiempo definidos sobre los cuales ocurren cambios en las ST, es posible emplear un número de diferencias igual al periodo de retraso, conocido como ciclo, para lograr que la serie sea estacionaria y obtener así estimadores que permitan su predicción con altos niveles de confianza estadística.

En la Figura 2.42 se observan los valores mensuales de las tres clases de ET y sus respectivas tendencias —identificadas por las líneas punteadas. Como puede observarse en las ecuaciones asociadas a sus rectas de regresión, los *ET-Solo daños* muestran una tendencia ascendente, mientras que los *ET-Fatales* y *ET-No fatales* se agrupan alrededor de su valor promedio con oscilaciones sobre tendencias de corto plazo asociadas al aumento en el periodo ya señalado.

Figura 2.1. Evolución de las variaciones en los ET, por clase de ET 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, las series mensuales *ET-Fatal*, *ET-No Fatal* y *ET-Solo Daños* muestran las mismas tendencias que las respectivas series anuales, no obstante, una mayor granularidad temporal puede ayudar a comprender elementos relevantes de la evolución del fenómeno para detectar distintos componentes de atención y periodicidad que podrían estar relacionados con efectos estacionales, eventos puntuales e incluso inconsistencias, asociados con valores fuera de lo común. Contar con herramientas más refinadas para efectuar las proyecciones de las series permite una estimación más precisa mediante intervalos de confianza estadística, así como la posibilidad de realizar ejercicios de simulación para obtener bandas de desviación sobre los valores futuros previstos.

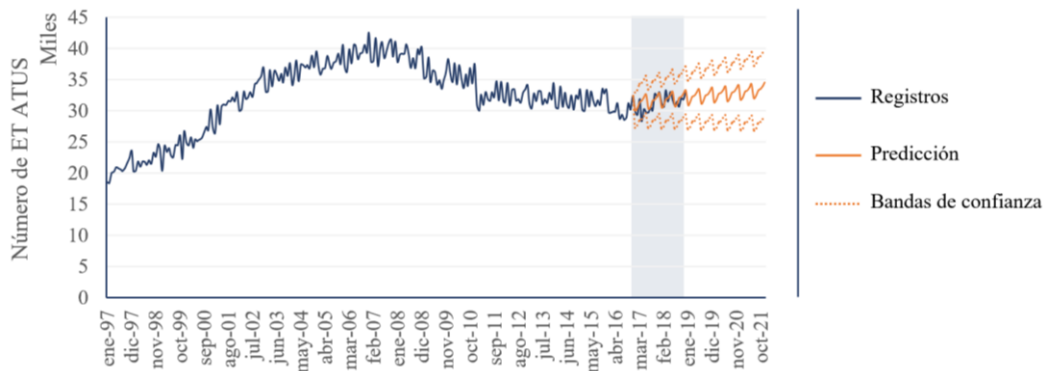
Una de las consecuencias de que la ST no sea estacionaria, es que su ACF teórica no esté definida y sólo sea posible conocer la ACF empírica. Sin embargo, observando el comportamiento de procesos casi estacionarios podemos poner en evidencia las siguientes regularidades:

1. La ACF disminuye muy lentamente a cero, la disminución no es exponencial de manera lineal.
2. La PACF toma el valor 1 para $k=1$ y cero en otro lugar.
3. Estas características de las ACF y PACF están motivadas por el predominio de la tendencia sobre las otras dinámicas de la serie. A menos que se elimine la tendencia, no se puede reconocer nada más de ACF y PACF, por ejemplo, otros componentes $AR(p)$ o $MA(q)$.

A partir de la información proveniente de la figura anterior es posible establecer los parámetros que logren un mejor ajuste a datos disponibles y aumentar nuestra confianza en las proyecciones realizados. Un método común para convalidar los pronósticos es suponer que no se conoce el periodo más reciente, utilizar la serie previa a ese punto de corte y realizar la proyección. De esta manera, es posible contrastar los valores pronosticados con los reales y medir los errores en las estimaciones.

Para realizar un ejercicio de pronóstico para las distintas clases de ET se ha adoptado esta aproximación suponiendo que no se posee el valor de ninguno de los 24 meses durante el periodo 2017.1-2018.12, por lo que solamente se utiliza el periodo 1997.1-2017.12 para realizar las estimaciones para los siguientes 60 periodos mensuales, produciendo mediante este proceso un conjunto de datos que llega hasta diciembre de 2020, con la posibilidad de contrastar la concurrencia entre los valores registrados y los pronosticados para 2017.1-2018.12, que es el periodo de superposición de los datos.

Figura 2.67. Pronóstico de la serie nacional de ATUS para 2017.1-2021.12



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 2.43 se muestra mediante la línea azul a la serie de tiempo de los registros obtenidos por ATUS. La línea sólida en color naranja muestra la tendencia de la serie: creciente con cuatro momentos estacionales al año, abril y octubre en los picos altos y enero y julio en los puntos más bajos; las líneas punteadas representan los valores de las bandas de desviaciones posibles al 95% de confianza mediante un modelo SARIMA y la franja vertical gris señala el periodo en el que es posible comparar las proyecciones con los valores reales. Como puede verse en la superposición de las líneas, el modelo predice bien la serie real y permite proyectar los valores durante 36 periodos más con un nivel de confianza estadística razonable ($R=0.55$, $p<0.001$).

Desde luego, es posible refinar el modelo subyacente con el fin de aumentar su poder predictivo, no obstante, además de no ser el objetivo de esta sección, más adelante se muestran algunas evidencias que ponen en duda la integridad de los registros ATUS en algunos periodos, sobre todo en lo que refiere al número de eventos, por lo que hacer ajustes para pronosticar una serie con estructura dudosa puede representar un despropósito y atentar contra la validez general de la especificación de los modelos.

2.4 Procesos de riesgo poblacional

Los indicadores son herramientas conceptuales que sirven para abstraer, sintetizar y, al mismo tiempo, profundizar en la comprensión de los fenómenos en un marco explicativo y de comparabilidad. El estudio de las DT mediante indicadores considera las dimensiones de riesgo imprescindibles que son detonadas por la ocurrencia de los ET, así como la magnitud de su frecuencia, impacto y severidad en la población en estudio, lo que se logra mediante un conjunto de ecuaciones que están interrelacionadas y que se pueden estimar y expresar en forma independiente y desagregada, permitiendo el diseño de experimentos y el análisis variacional ante distintos escenarios mediante los datos existentes en México.

Definición 38. La *Incidencia de los ET* en una población es el PE $\{J(\varepsilon; \tau): t \in T\}$ que pondera la frecuencia de ET respecto a la población en un espacio acotado ε y tiempo dado τ , que se puede estimar mediante la función de densidad que produce los ET en el espacio $(\varepsilon; \tau)$ con $\tau \in [0, \beta]$

$$J(\varepsilon; \tau) = \Pi_{t_t}(\varepsilon)^{-1} \int_0^\beta f_{ET}(\varepsilon, \tau, t) dt \quad (2.47)$$

Cuando la VA $J_t(\varepsilon)$ es discreta, puede estimarse mediante el cociente entre las variables aleatorias $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$ y $\Pi_t(\varepsilon)$, es decir, el número de ET y la población total en el mismo espacio ε y periodo t , como indica la ecuación 2.48:

$$J_t(\varepsilon) = \Pi_t(\varepsilon)^{-1} \cdot \mathcal{N}_t(\varepsilon) \quad (2.48)$$

Que, al tomar esperanzas, se convierte en

$$E[J_t(\varepsilon)] = i_t(\varepsilon) = \pi_t(\varepsilon)^{-1} \cdot n_t(\varepsilon) \quad (2.49)$$

Además, la siguiente ecuación confirma que la incidencia de las m consecuencias es aditiva:

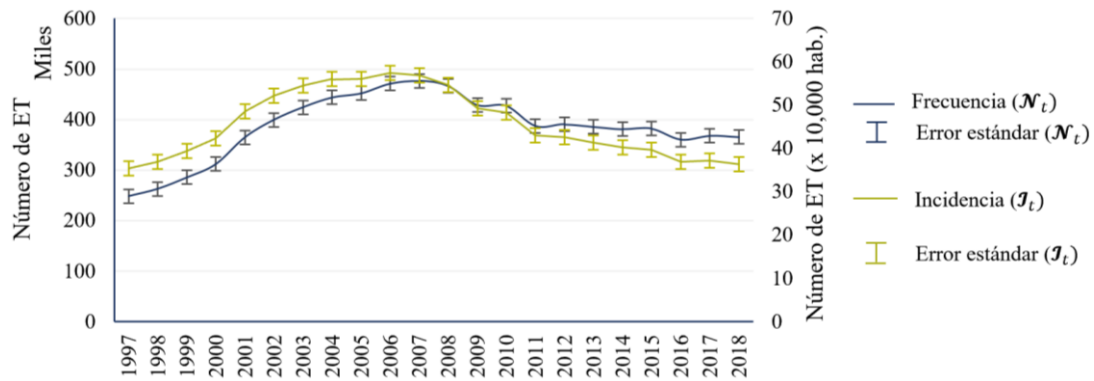
$$J_t(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{c_m} J_t(\varepsilon; i) \quad (2.50)$$

Que en el caso del análisis sobre ATUS, se traduce en

$$J_t(ATUS, Total) = J_t(ATUS, Fatal) + J_t(ATUS, No fatal) + J_t(ATUS, Solo daños) \quad (2.51)$$

En la Figura 2.44 se muestra las series de tiempo de los procesos de frecuencia e incidencia, los cuales poseen la misma estructura y en la cual el único deflactor de los valores de la frecuencia es el crecimiento de la población, por lo que conserva la misma forma con distintas pendientes y en el que la magnitud del fenómeno, después de un incremento sostenido durante 10 años, disminuye y tiende a volver a los niveles observados en 1997.

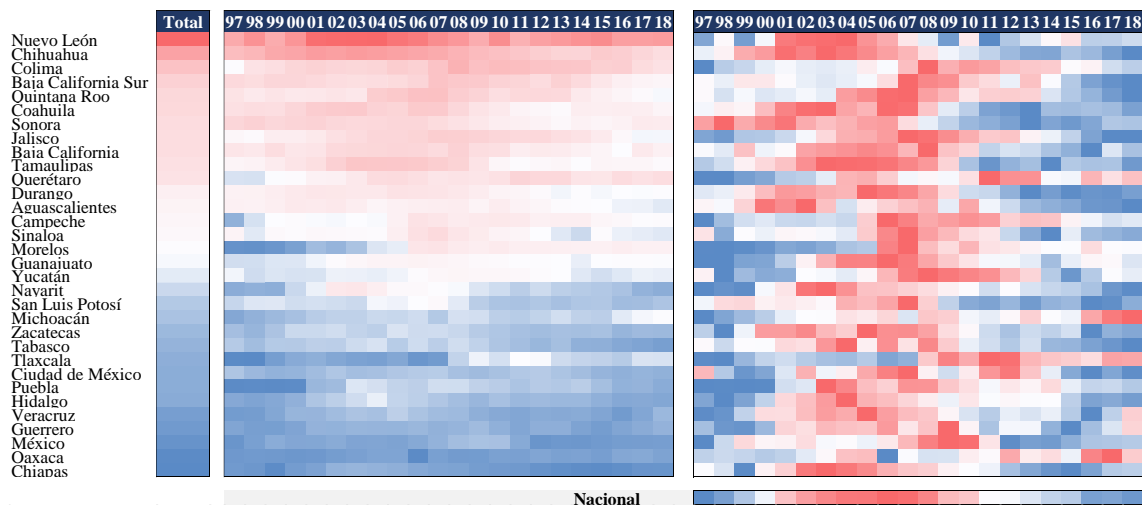
Figura 2.68. Procesos de frecuencia e incidencia. Nacional 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Al igual que en las matrices de transición anteriores, en la Figura 2.45 se muestra la evolución de la incidencia de los ET para cada entidad federativa a lo largo de los años. Como puede verse, al considerar el crecimiento poblacional estatal, las entidades con mayor incidencia de ET son Nuevo León, Chihuahua, Colima y Baja California Sur, mientras que Veracruz, Guerrero, el Estado de México, Oaxaca y Chiapas cuentan con los menores niveles. Asimismo, al igual que en el proceso de frecuencia, el periodo con mayor incidencia comienza en los primeros años del milenio y en la mayoría de los estados permanece en niveles altos hasta el final de la década.

Figura 2.69. Distribución y evolución de la Incidencia. ATUS estatal, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como se ha visto en la ecuación 2.52, la descomposición de la función que estima la incidencia total por ET permite su desagregación mediante métodos aditivos, lo que permite estimar e identificar el fenómeno para cada tipo de ET sobre el conjunto de personas vivas, las cuales también podrían

registrarse mediante diversas características individuales, tales como su sexo, edad, nacionalidad, tipo de usuario, vulnerabilidad o cualquier otro atributo mediante lo siguiente:

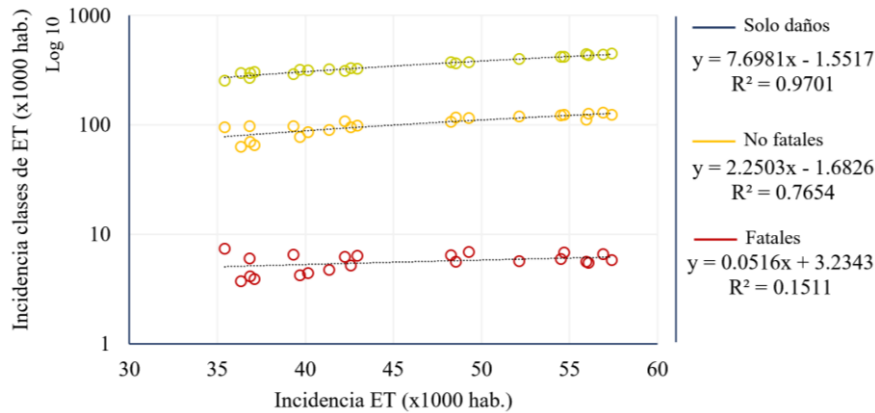
$$E[J_t(\varepsilon; \cdot)] = i_t(\varepsilon; \cdot) = \frac{n_{\tau_t}(\varepsilon; \cdot)}{\pi_t(\varepsilon; \cdot)} \quad (2.52)$$

Además, la siguiente ecuación confirma que la incidencia de las m consecuencias o clases, también es aditiva:

$$J_t(\varepsilon) = \sum_{i=1}^m J_t(\varepsilon; i) \quad (2.53)$$

De la misma manera que en el proceso de frecuencia $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$, resulta de interés la relación entre la incidencia total y la incidencia por cada una de las clases de ET. Como puede observarse en la Figura 45, el coeficiente de determinación R^2 entre la serie $i_t(Total)$ y las clases de ET son bastante distintos. Para $i_t(Solo\ da\~{n}os)$, $R^2 = 0.97$, lo que muestra una relación lineal casi perfecta en la que el aumento de los ET observado en el tiempo se traduce principalmente en eventos que solo producen daños materiales. Asimismo, el valor de $R^2 = 0.76$ para $i_t(No\ fatal)$ señala que la dinámica de los ET también conduce la de los *ET-No fatales*, solo que con menor intensidad en algunos años.

Figura 2.70. Relación entre la incidencia total y la incidencia por clases de ATUS 1997-2018

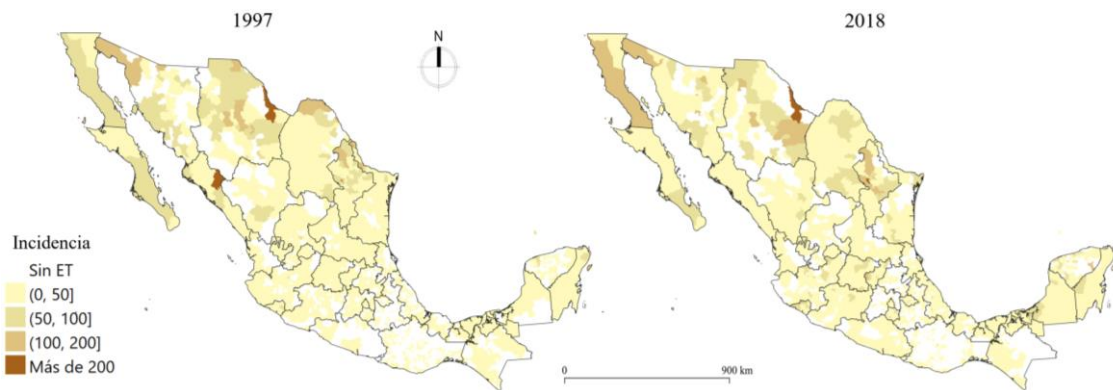


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por lo contrario, el coeficiente de $R^2 = 0.15$ para $i_t(Fatal)$ sugiere que los *ET-Fatales* han evolucionado con una dinámica propia y que el aumento o disminución de las probabilidades de participar en un ET no determina directamente las probabilidades de fallecer por un evento de tránsito, es decir, que los cambios en las muertes producidas por los ET dependen muy poco de las variaciones en la frecuencia con la que ocurren, o por lo menos de la frecuencia registrada, lo que coloca una alerta sobre la calidad de los datos.

A continuación se muestran los niveles de incidencia de los ET a nivel municipal y la forma en la que han variado de 1997 a 2018. Como puede verse, los municipios del norte de la República muestran mayor incidencia en ambos años y existe un aumento en el número de municipios con registros de ET.

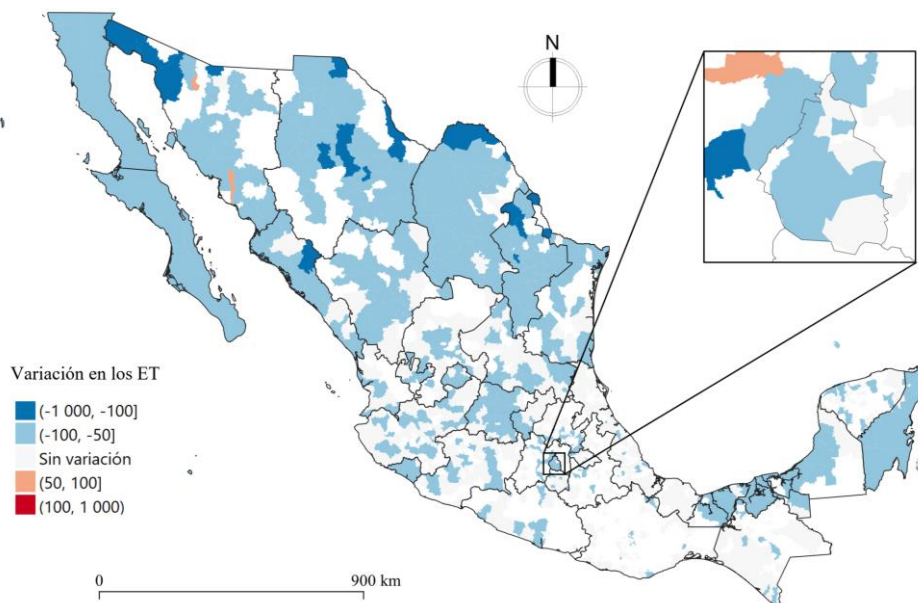
Mapas 2.71a y 2.12b. Niveles de *Incidencia de ET* en los municipios, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

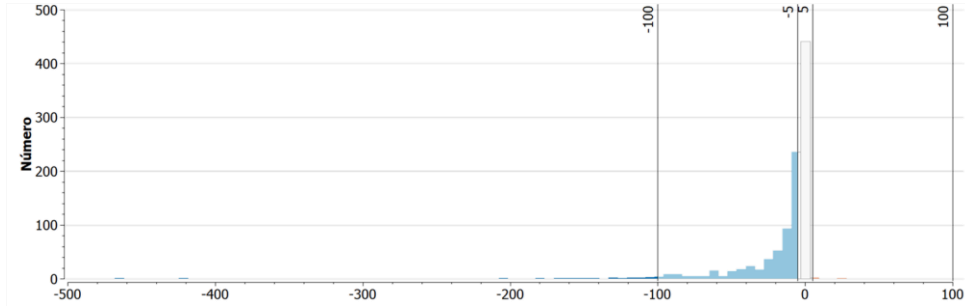
Como complemento a los cartogramas anteriores, el Mapa 2.13 muestra la variación de la incidencia de ET en el periodo 1997-2018 a nivel municipal, como puede verse, a pesar de que los municipios con los mayores niveles son prácticamente los mismos, la distribución espacial ha variado significativamente, ya que han sucedido dos fenómenos relevantes: 1) la intensidad ha disminuido en la mayoría de los municipios entre 50 y 100 puntos y en pocos casos ha aumentado la incidencia; 2) existen más municipios con ET, como señala la distribución de las frecuencias asociado al Mapa 2.13.

Mapa 2.72. Variación de la *Incidencia de ET* en el periodo 1997-2018, a nivel municipal



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Figura 2.73. Histograma de las variaciones municipales, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como se ha visto, a pesar de las enormes pérdidas financieras por los altas cifras registradas por ET, su mayor impacto se observa en el sector salud, ya que tanto los heridos como las defunciones significan una pesada carga para la sociedad, lo que requiere ser modelado con precisión para realizar mejores estimaciones y poder valuar las pérdidas contingentes potenciales, lo que demanda nuevas definiciones.

Definición 39. El número de *defunciones totales* en un espacio ε y en el tiempo t , es un proceso de conteo que puede ser continuo o discreto en el tiempo y está dado por la colección de VA $\{\mathbb{D}(\varepsilon; \tau) \in \mathbb{N} \cup \{0\} \forall \tau \text{ y } \varepsilon\}$, que refiere a las personas fallecidas en el espacio ε durante el periodo de tiempo $t \in [\beta_0, \beta_1)$, con $\beta_0, \beta_1 < 1$.

La esperanza matemática de $\mathbb{D}_t(\varepsilon)$ es $E[\mathbb{D}_t(\varepsilon)] = \mathbb{d}_t(\varepsilon)$, tal que $f_{\mathbb{D}}(\varepsilon, t)$ es la función de densidad de la ocurrencia de defunciones sobre el conjunto acotado por el binomio paramétrico (ε, τ) , para lo cual se cumple:

$$\mathbb{D}(\varepsilon; \tau) = \int_{\beta_0}^{\beta_1} f_{\mathbb{D}}(\varepsilon, t) dt \quad (2.54)$$

Por lo que la esperanza del proceso al tiempo $\tau \in [\beta_0, \beta_1)$

$$E[\mathbb{D}(\varepsilon; \tau)] = \int_{\beta_0}^{\beta_1} t f_{\mathbb{D}}(\varepsilon, t) dt \quad (2.55)$$

Cuando la colección de tiempos $\{\tau - k, \tau - k - 1, \dots, \tau, \tau + 1, \dots, \tau + k\}$ es discreta, el proceso se escribe $\mathbb{D}_\tau(\varepsilon)$ y se estima de la siguiente manera:

$$\mathbb{D}_\tau(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n \mathbb{D}_i(\varepsilon, \tau) \quad (2.56)$$

Además, si $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_z$ es una partición del espacio ε_τ , entonces:

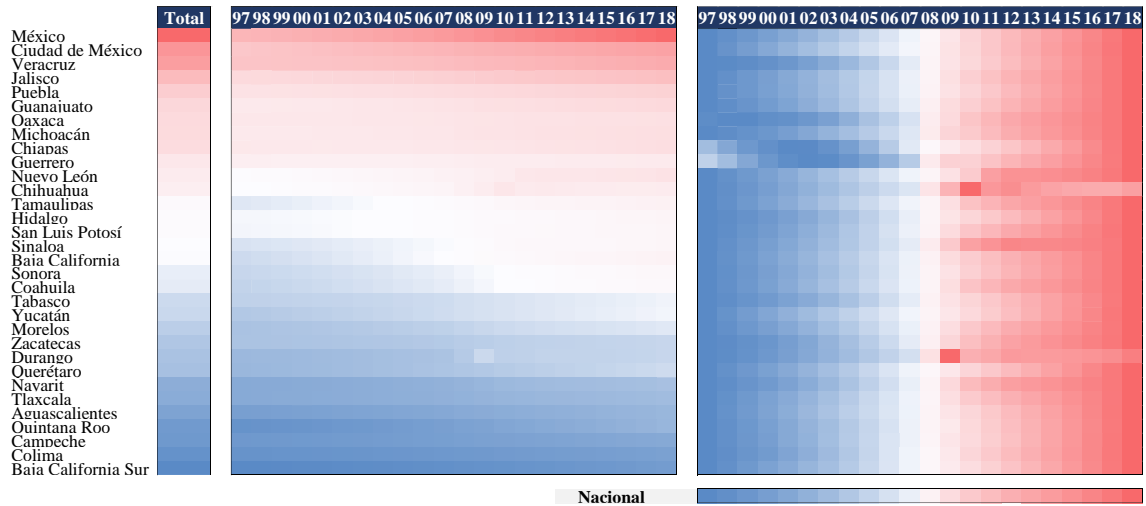
$$\mathbb{D}_t(\varepsilon) = \sum_{i=1}^Z \mathbb{D}_t(\varepsilon_i) \quad (2.57)$$

Por lo cual se cumple que:

$$E[\mathbb{D}_t(\varepsilon)] = E\left[\sum_{i=1}^Z \mathbb{D}_t(\varepsilon_i)\right] = \sum_{i=1}^Z E[\mathbb{D}_t(\varepsilon_i)] = \sum_{i=1}^Z d_t(\varepsilon_i) \quad (2.58)$$

En la matriz de la Figura 2.48 se muestran los valores absolutos de las defunciones totales. Debido a su tamaño de población, el Estado de México, la Ciudad de México, Veracruz, Jalisco y Puebla presentan los mayores números, mientras que Aguascalientes, Quintana Roo, Campeche, Colima, y Baja California Sur son los menores.

Figura 2.74. Distribución y evolución del número de defunciones totales; estatal, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, existen múltiples causas para que ocurra un deceso, por lo que es necesario extender las definiciones para el estudio de los ET.

Definición 40. El número de defunciones producidas por ET sobre el espacio ε y durante el periodo de tiempo $t \in [\beta_0, \beta_1)$, con $\beta_0, \beta_1 < 1$, se denota por $\mathcal{D}_t(\varepsilon)$ tal que

$$\mathcal{D}(\varepsilon, t) = \mathcal{D}_t(\varepsilon) = \int_{\beta_0}^{\beta_1} f_{\mathcal{D}}(\varepsilon, t) dt \quad (2.59)$$

Por lo que la esperanza del proceso al tiempo $t \in [\beta_0, \beta_1)$

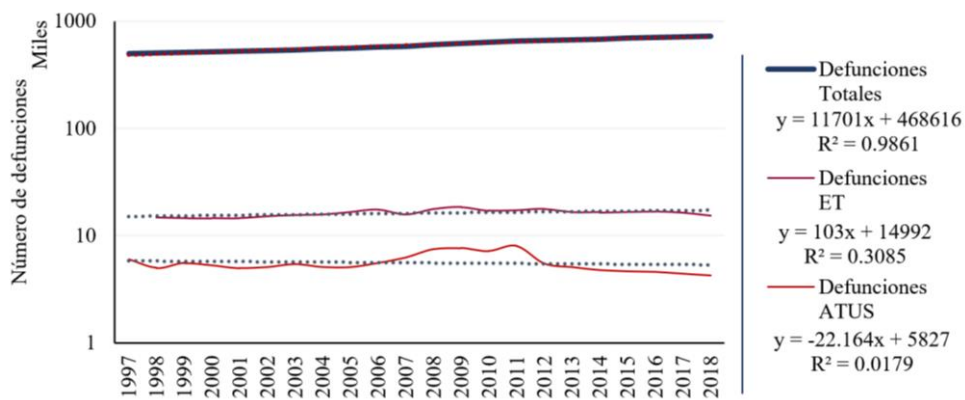
$$E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)] = \int_{\beta_0}^{\beta_1} t f_{\mathcal{D}}(\varepsilon, t) dt = d_t(\varepsilon) \quad (2.60)$$

De las ecuaciones 59 y 60 se deduce inmediatamente que:

$$d_t(\varepsilon) = d_t(ATUS) + d_t(Complemento) \quad (2.61)$$

Este resultado puede verse en la Figura 2.49, que muestra cómo las defunciones totales en el país han ido en aumento de manera continua durante todos los años, alcanzando en 2018 un incremento de 44.4% respecto a 1997, al pasar de 499,569 fallecimientos en 1997 a 728,507 en 2018; mientras que el número de defunciones por ET a nivel nacional aumentó solamente 8.4% —de 14,795 en 1998 a 16,035 en 2018—, lo que va en dirección contraria al decremento de 15.2% observado en las defunciones por ET ocurridas anualmente en las zonas urbanas y suburbanas —de 6,039 en 1997 a 4,227 en 2018—, que en ese mismo periodo acumuló 116,548 defunciones.

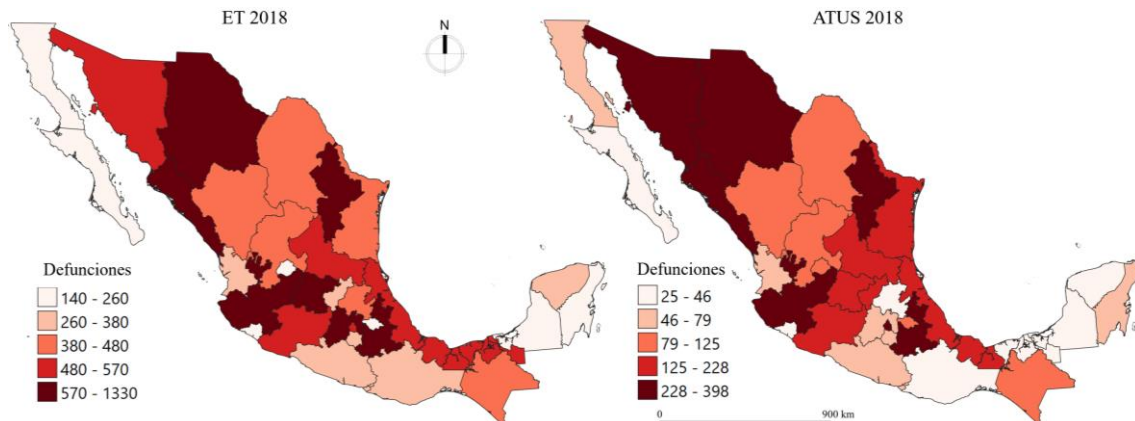
Figura 2.75. Evolución del número de defunciones totales por ET y ATUS, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Además, como puede verse en los Mapas 2.14a y 2.14b, en 2018 las defunciones son predominantes en las entidades: Estado de México (1,329), Jalisco (1,285), Guanajuato (1,060), Puebla (824) y Nuevo León (692), mientras que las entidades con mayor número de defunciones por ATUS son Jalisco (398), Sinaloa (302), Chihuahua (294), Nuevo León (249) y Ciudad de México (240).

Mapas 2.76a y 14b. Defunciones por ET y ATUS en las entidades durante 2018



Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

En este sentido, el número de fallecimientos por ET motivados por la r -ésima causa en el espacio ε , se denota por la VA $\mathcal{D}_t^r(\varepsilon)$ y su esperanza $E[\mathcal{D}_t^r(\varepsilon)] = d_t^r(\varepsilon)$. Además, si $\{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ es el conjunto de causas posibles de defunción, se cumple lo siguiente:

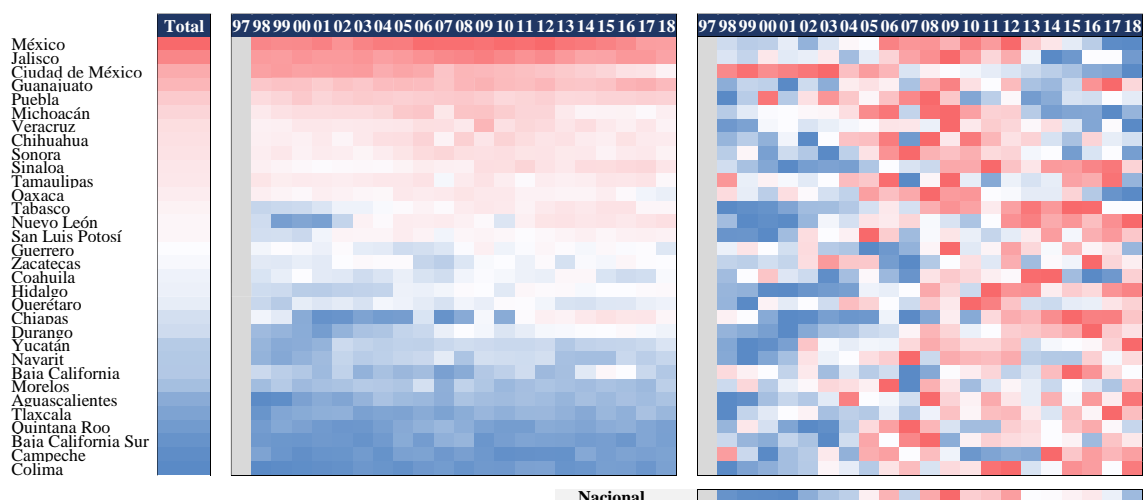
$$\mathbb{D}_t(\varepsilon) = \sum_{j=1}^r \mathcal{D}_t^j(\varepsilon)$$

$$E[\mathbb{D}_t(\varepsilon)] = E[\mathbb{D}_t(\varepsilon)] = E\left[\sum_{j=1}^r \mathcal{D}_t^j(\varepsilon)\right] = \sum_{j=1}^r E[\mathcal{D}_t^j(\varepsilon)] = \sum_{j=1}^r d_t^j(\varepsilon) \quad (2.62)$$

A partir de estos resultados, es posible obtener las defunciones provocadas por ET en cada unidad político-administrativa en la que se tenga registro. Aunque el análisis detallado de las defunciones se lleva a cabo en el Capítulo 3, es útil mostrar cómo han evolucionado en el tiempo. Contar con un panorama claro sobre en qué entidades existe mayor número de defunciones ayuda a prever y asignar recursos, así como a diseñar estudios que den cuenta de los factores asociados con las características de los difuntos.

Las matrices de la Figura 2.50 muestran que, a pesar de que los números absolutos de población son determinantes en las defunciones, el orden no es el mismo que el de las defunciones totales, ya que primero aparece el Estado de México, luego Jalisco, la Ciudad de México, Guanajuato, Puebla y Michoacán, permitiendo detectar fenómenos diferenciales que podrían vincularse con la cantidad de vehículos en cada entidad, la intensidad de circulación u otros factores intensivos, así como con las cualidades de los sistemas de tránsito y de la educación y regulación vial.

Figura 2.77. Distribución y evolución del número de defunciones por ET; estatal, 1997-2018

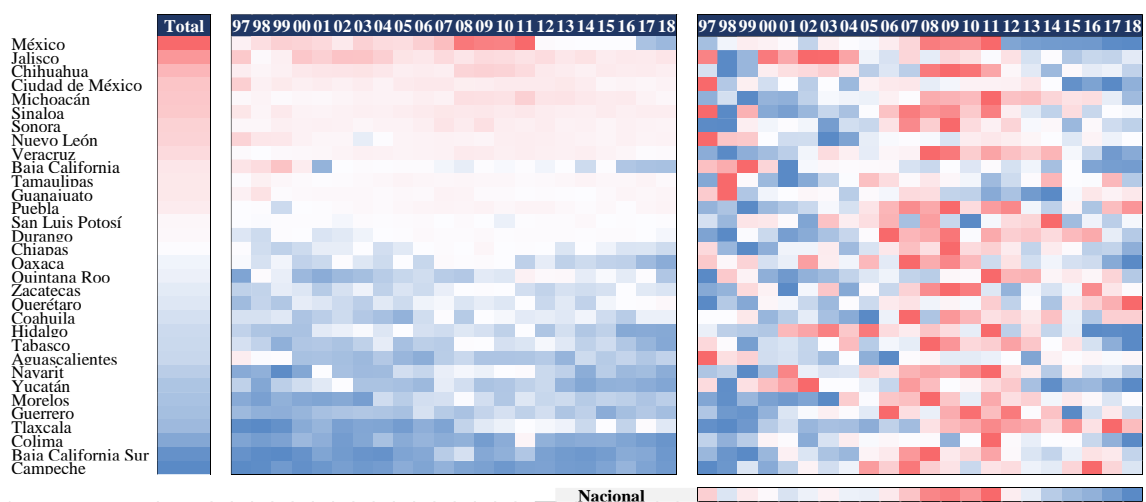


Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Por su parte, las defunciones por ET mostradas en la Figura 2.51 señalan que México, Jalisco, Ciudad de México, Guanajuato y Puebla son los estados con mayor número de defunciones. Por lo contrario, Tlaxcala, Quintana Roo, Baja California Sur, Campeche y Colima poseen los menores registros, lo que después se verá distinto al ponderar los números con la población.

Asimismo, cuando el análisis se limita a las zonas urbanas y suburbanas, aunque en primer lugar aparece de nuevo el Estado de México, el orden de las demás entidades y la distribución de los números cambia de manera relevante ya que, en el orden de mayor a menor, le sigue Jalisco, Chihuahua, Ciudad de México, Michoacán, Sinaloa, Sonora y Nuevo León.

Figura 2.78. Distribución y evolución del número de defunciones por ATUS; estatal, 1997-2018

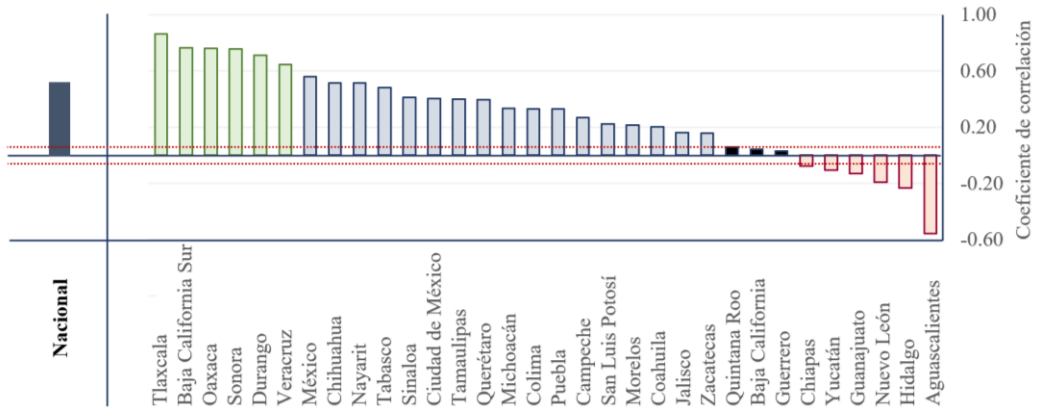


Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

A partir de estos comparativos, resulta de especial interés que la matriz de defunciones luzca similar a la de los ET respecto a la concentración en el periodo 2008-2011, sobre todo en algunos estados como Jalisco, Ciudad de México, Sinaloa, Nuevo León y Aguascalientes, en los que el número de defunciones es mayor en el inicio de la serie que al final y que además mantienen una tendencia decreciente, lo que implica que estas han logrado disminuir sus *ET-Fatales* en forma significativa y sugiere estudiarlos con mayor detalle.

En la Figura 2.52 se muestra el coeficiente de correlación entre las defunciones motivadas por ATUS y el total ocurridas por ET a través de los años, tanto a nivel de país como para cada entidad federativa.

Figura 2.79. Correlación entre las defunciones por ET y por ATUS. Estatal 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Aunque no existe una razón evidente para este fenómeno, resulta de interés que a nivel nacional sea de 0.53 y que solo para seis entidades federativas sea superior a 0.6, en tres sea estadísticamente nula y en seis más sea negativa —cuando aumentan las defunciones por ET en todo el estado, bajan en las zonas urbanas—, un fenómeno para el que no se halla una explicación directa que no redirija el asunto a los métodos de registro.

Un punto notable que se desprende de este planteamiento es el hecho de que no existan más análisis en la literatura sobre este particular, sobre todo, porque ATUS es un subconjunto del total y, de acuerdo con los protocolos nacionales, la Secretaría de Salud registra todos y cada una de las defunciones y lleva un riguroso sistema de registro y conteo, por lo que el sentido común indicaría que la evolución conjunta de estos registros debería ser relativamente cercana o, al menos, en la misma dirección, lo que vuelve a señalar la necesidad de revisar los sistemas de registro y las metodologías que lleva a cabo INEGI para establecer los conteos de las defunciones por ATUS.

Para analizar los ET en forma dinámica y por tipo de usuario, es necesario desagregar sus mediciones y desarrollar parámetros específicos para cada caso. En este sentido, una adecuada notación se vuelve especialmente útil no solo para la correcta especificación de variables y modelos, sino para diseñar métodos de estimación consistentes y algoritmos de cálculo que permitan la aplicación de resultados teóricos en todas las fases de registro, consolidación y estimación de las cifras, produciendo datos que puedan compararse en forma estable a lo largo del tiempo.

Definición 41. La *oportunidad relativa* (OR^{25}) de los ET, dentro del espacio ε y tiempo t , es el cociente entre la frecuencia relativa de las defunciones motivadas por un ET respecto a las defunciones por todas las causas —en el mismo espacio de estudio— y el complemento de dicha frecuencia, es decir,

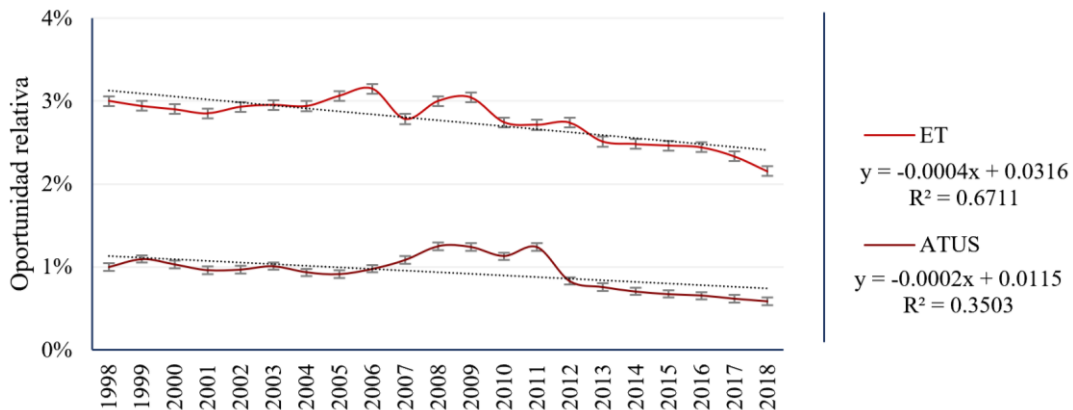
$$OR_t(\varepsilon; ET, Total) = \frac{d_t(\varepsilon)/\mathbb{d}_t(\varepsilon)}{1 - d_t(\varepsilon)/\mathbb{d}_t(\varepsilon)} = \frac{d_t(\varepsilon)}{\mathbb{d}_t(\varepsilon) - d_t(\varepsilon)} = \eta_t^{ET}(\varepsilon) = \eta_t(\varepsilon) \quad (2.63)$$

Por extensión, si las defunciones por ET están dados por ATUS en el tiempo t , entonces

$$OR_t(ATUS; ET, Total) = \eta_t(ATUS) = \frac{E[D_t^{ET}(ATUS)]}{E[\mathbb{D}_t(\varepsilon) - D_t^{ET}(ATUS)]} = \frac{d_t^{ET}(ATUS)}{\mathbb{d}_t(\varepsilon) - d_t^{ET}(ATUS)} \quad (2.64)$$

A pesar de que los valores absolutos de las defunciones por ET aumentan a través del tiempo, su participación proporcional entre todas las defunciones registradas en el país posee una tendencia decreciente, lo que también se observa en los ATUS. Las estimaciones de las pendientes de regresión mostrados en la Figura 2.53 muestran la que la magnitud de la desaceleración de ET totales (-0.0004x) duplica a la de los ATUS (-0.0002x), lo que implica la necesidad de investigar a profundidad lo que ocurre en las zonas urbanas de México de mayor incidencia.

Figura 2.80. Evolución de la *OR de ET y ATUS* respecto defunciones totales, 1998-2018

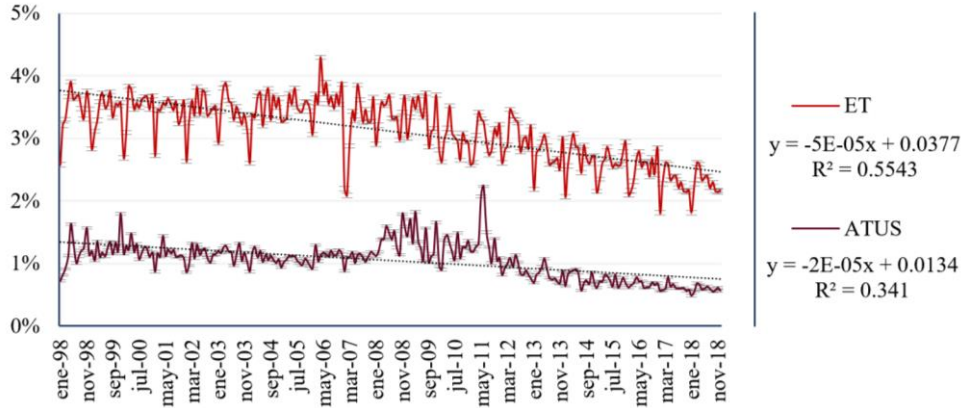


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En este mismo sentido, la desagregación mensual de las defunciones por ET y ATUS realizada en la Figura 2.54 muestra el mismo fenómeno de la Figura 2.53 en periodos mensuales que permiten identificar las oscilaciones estacionales en las variaciones con mayor precisión, así como el cambio abrupto en los registros durante el periodo 2008-2011, ya señalado anteriormente.

²⁵ También conocida con el término inglés *odds ratio*.

Figura 2.81. Evolución de la *OR de ET y ATUS* respecto defunciones totales, 1998.1-2018.12



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con el fin de reconocer y monitorear los cambios abruptos en las mediciones que puedan brindar elementos de valoración sobre la calidad de los datos, se extiende la definición anterior hacia la relación ATUS-ET.

Definición 42. La *oportunidad relativa de ET en un espacio ε_r respecto a ε* en el tiempo t , se define como:

$$OR_t(\varepsilon_r) = \frac{\eta_t(\varepsilon_r)/\eta_t(\varepsilon)}{1 - \eta_t(\varepsilon_r)/\eta_t(\varepsilon)} \quad (2.65)$$

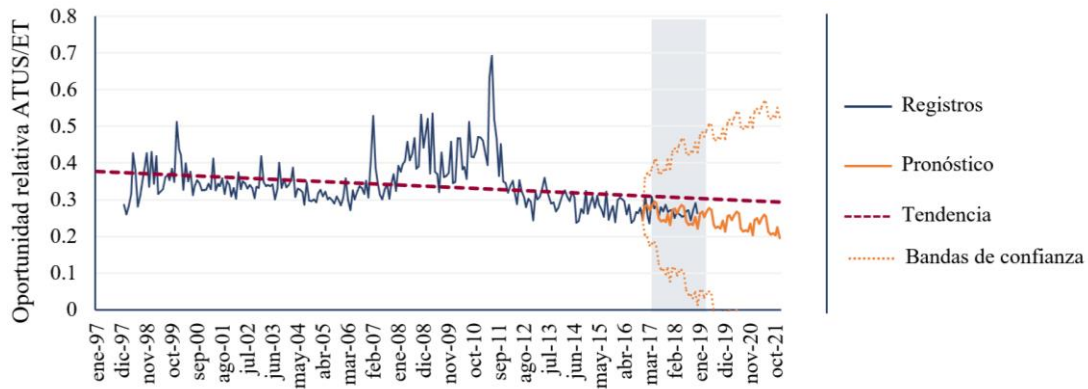
Que en el caso de ATUS queda como

$$OR_t(ATUS) = \frac{\eta_t(ATUS)/\eta_t(\varepsilon)}{1 - \eta_t(ATUS)/\eta_t(\varepsilon)} \quad (2.66)$$

En la Figura 2.58 se observa mediante la línea azul la evolución de $\xi_t(ATUS)$, con su tendencia marcada por la línea punteada en color rojo, la cual va acompañada de un pronóstico a 60 meses — concurrente con los registros durante los 24 meses del periodo 2017.1-2018.12— y sus bandas al 95% de confianza estadística.

Como puede observarse en la Figura 2.55, la secuencia de valores atípicos en el periodo 2008-2011 de nuevo resulta bastante notable e incorpora una gran cantidad de varianza a toda la serie, lo que sugiere, una vez más, revisar ese periodo de registro a profundidad para confirmar que no se ha alterado la metodología de estimación en ningún punto de la serie.

Figura 2.82. Evolución de la OR de defunciones ATUS respecto a ET. Nacional 1998.1-2018.12



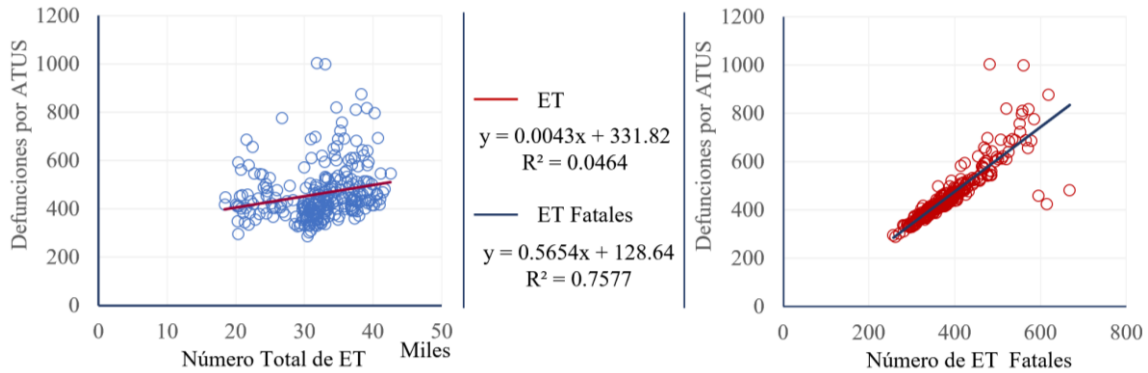
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como el análisis de la incidencia se relaciona con qué tan severos son los eventos fatales, esta medida es sobre todo relevante cuando se tienen múltiples fuentes de registro con distinta calidad, como es el caso de la República Mexicana, debido a la ausencia de un sistema nacional robusto que permita contar con datos estables sobre los ET y en la que la calidad del dato varía en función de la consecuencia, especialmente cuando el ET es más severo y produce heridos o fallecimientos que son más difíciles de ocultar o manipular.

Para discernir si el aumento en la frecuencia de ET impacta en la variación del número de defunciones por ET y su relevancia en las estimaciones y pronósticos de las defunciones, es necesario eliminar el ruido inducido por los registros de todos los ET en la misma cifra. La Figura 2.56 muestra dos gráficas de dispersión: la del lado izquierdo con círculos azules muestra la correlación entre el número total de ET y el número de defunciones por ATUS, que es insignificante ($R^2=0.0464$, $p<0.001$); la segunda en círculos rojos muestra la correlación entre el número de ET-Fatales y el número de defunciones: una relación lineal significativa ($R^2=0.7577$, $p<0.001$) que exhibe muy pocas desviaciones.

Este punto es vital para la comprensión de la relación entre las variables porque una primera aproximación podría sugerir que el efecto en el aumento de las defunciones de un mayor número de ET es nulo, de lo que podría desprenderse que no es necesario diseñar políticas para la frecuencia de los eventos y constituirse en un error conceptual debido a que, para interpretar adecuadamente este fenómeno, es necesario considerar el subregistro de todos aquellos ET que solo producen daños (González-Perez et al, 2015).

Figura 2.83. Relación entre los ET y *ET-Fatales* con las defunciones por ET, 1998-2018

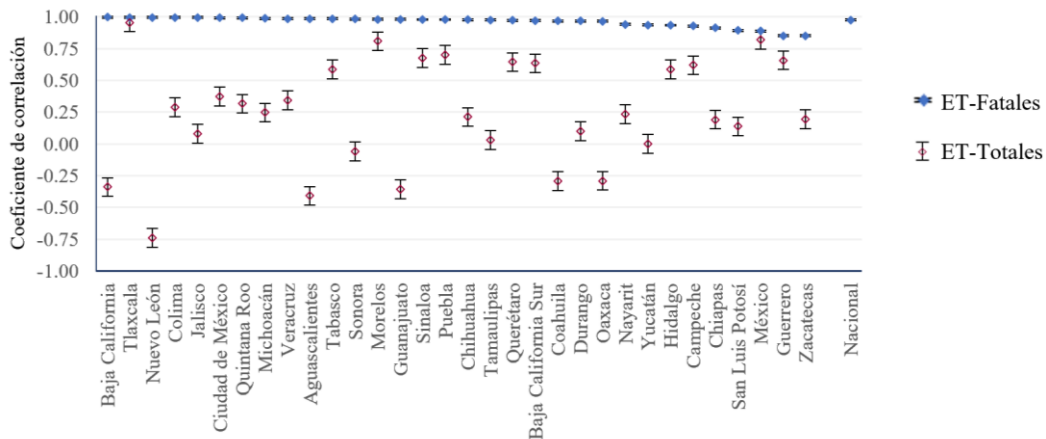


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Adicionalmente, como puede observarse en el gráfico de dispersión de los círculos rojos, el alto nivel de correlación entre ambas variables indica que cuando aumenta el número de *ET-Fatales* a nivel nacional, aumenta el número de defunciones, algo obvio, pero que permite desestimar que el problema de subregistro proviene de esta clase de consecuencia.

Ahora bien, con el fin de discernir en qué estados existe una correlación significativa entre las defunciones por ATUS y la frecuencia de ET, se estimó la *Matriz de correlaciones estatales* entre las defunciones por ET y las series *ET-Totales* y *ET-Fatales*.

Figura 2.84. Evolución de las defunciones por ET y de los *ET-Fatales*, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 2.57 se muestra que, para algunas entidades como Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Nuevo León y Oaxaca, la correlación entre las defunciones y los *ET-Totales* es negativa, mientras que la correlación entre defunciones y *ET-Fatales* es altamente significativa en todos los estados.

Como se ha visto, los resultados anteriores presentan diversos retos de análisis sobre las variaciones inusuales en las series de tiempo que usualmente son estables, lo que conduce intuitivamente al concepto de letalidad de los ET.

Definición 43. La *letalidad de los ET* en el año t sobre el espacio ε , se denota por $\mathcal{L}_t(\varepsilon)$, indica el número de defunciones producidas por los ET y se estima mediante

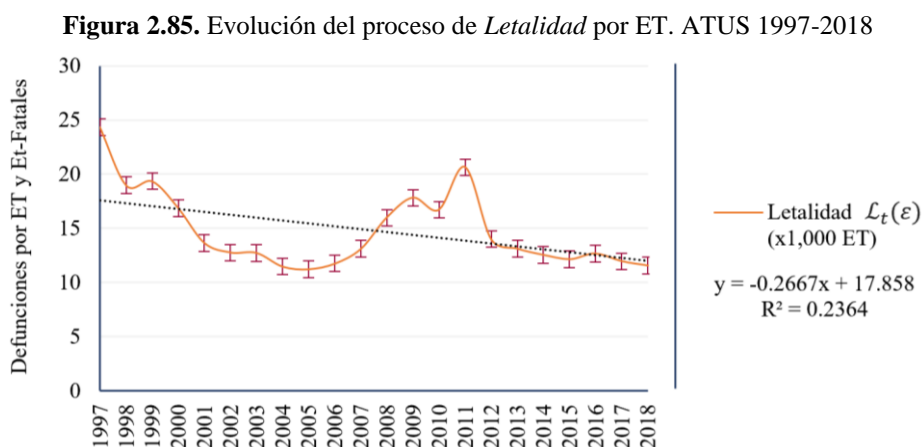
$$\mathcal{L}_t(\varepsilon) = \mathcal{D}_t(\varepsilon)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau) = \frac{\mathcal{D}_t(\varepsilon)}{\mathcal{N}_t(\varepsilon)} \quad (2.67)$$

Y su esperanza está dada por

$$E[\mathcal{L}_t(\varepsilon)] = \frac{E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)]} = \frac{d_t(\varepsilon)}{n_t(\varepsilon)} = \lambda_t(\varepsilon) \quad (2.68)$$

Típicamente, la letalidad se expresa en valores enteros para señalar qué tan severos son los eventos, por lo que es una medida de la intensidad de las DT relacionadas con la inseguridad de la infraestructura, los vehículos y la dinámica de los eventos, ya que las probabilidades de que un ET sea fatal dependen principalmente de las condiciones de seguridad, reacción y atención, una vez materializada la DT.

En la Figura 2.58 se muestra la magnitud de la letalidad para el periodo 1997-2018. A pesar de que existen diversas dinámicas que producen ET, la magnitud de las consecuencias y que estas no lleguen a ser fatales depende de las acciones humanas, por lo que este debería ser uno de los principales puntos de atención de las acciones de política. En este sentido, el uso del cinturón, las bolsas aire y la calidad de los autos y sus elementos de seguridad suelen marcar la diferencia en la letalidad de los ET.

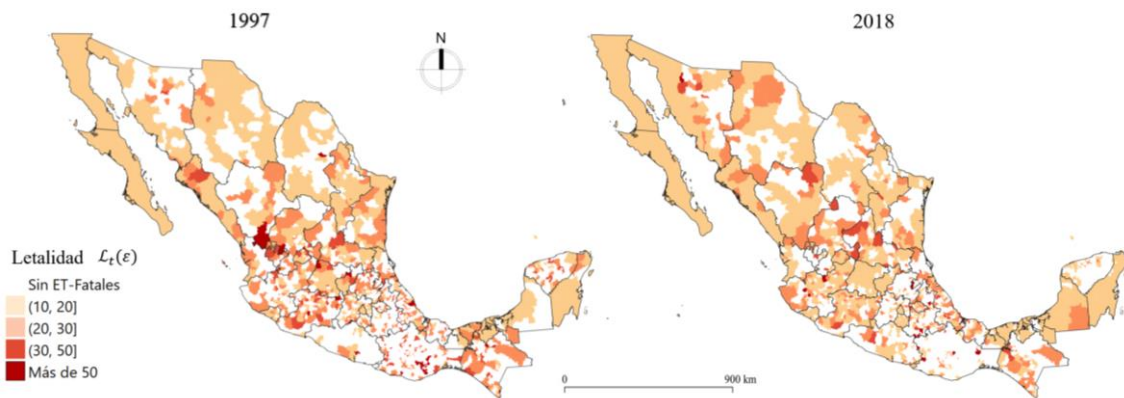


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

La línea continua en color naranja muestra el comportamiento de la letalidad en las últimas décadas. Si bien la tendencia ha sido disminuir hasta alcanzar 48% —pasando de 24 a 13 defunciones por cada 1,000 ET— es necesario señalar que estos niveles ya se habían alcanzado desde 2001 y que el fenómeno se mantuvo en ese nivel hasta 2007, año en el que comenzó a aumentar hasta alcanzar 21 muertes por cada mil ET, para luego volver a descender a los niveles de inicio del siglo; lo que implica que no ha habido ninguna mejora real desde entonces, algo muy alarmante dados los esfuerzos del Estado en términos regulatorios y los enormes avances tecnológicos en materia de seguridad vial, sobre todo en las zonas urbanas del país.

Como puede verse al comparar los Mapas 2.15a y 2.15b, algunas entidades federativas muestran menos municipios con *ET-Fatales*, en consecuencia, las zonas urbanas y suburbanas las fatalidades disminuyeron de manera importante, como es el caso de Oaxaca, en donde en 1997 había 57 municipios con defunciones por ET y en 2018 se ha reducido a 14, lo que también se observa en el Estado de México e Hidalgo, que pasaron de 49 a 12 y de 34 a 11 municipios con defunciones por ET, respectivamente. Por lo contrario, en algunas entidades hubo más municipios con defunciones por ET, como es el caso de Puebla (41), Tlaxcala (23), Guerrero (18), Michoacán (13), Morelos (12) y Sonora (10), lo que puede observarse en los Mapas 2.15a y 2.15b.

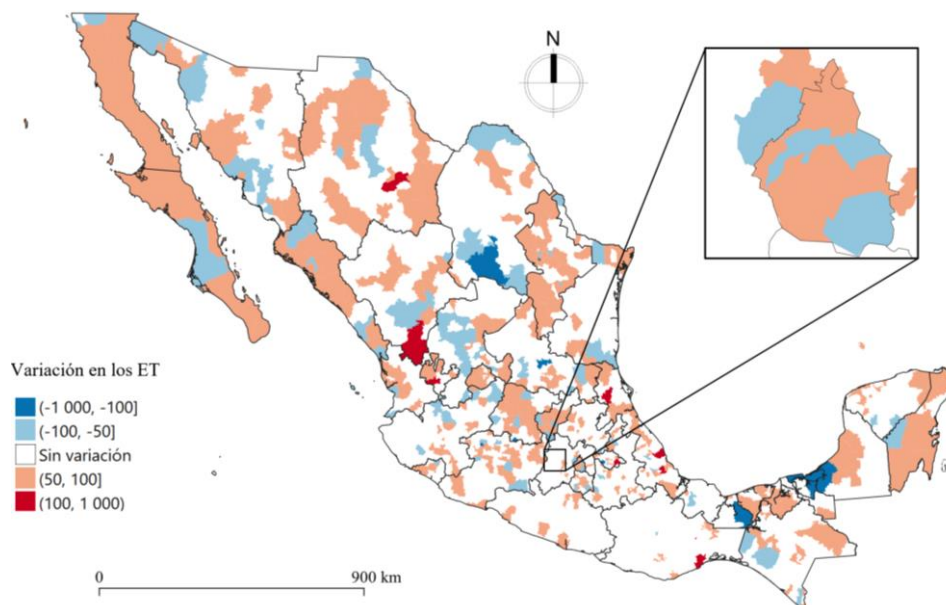
Mapas 2.86a y 15b. Letalidad en los municipios en los años 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Al igual que la letalidad, la tasa de mortalidad se multiplica por algún factor para interpretarlo de manera más sencilla, aunque no siempre es necesario hacer la transformación. En Mapa 2.16 se observa el rango de variación del número de defunciones por cada 1,000 ET; al inicio de la barra celeste se encuentra el mínimo de toda la serie, en la línea entre las barras se ubica el promedio, y al final de la barra amarilla se expresa el valor máximo de cada entidad.

Mapa 2.87. Variación de la *Letalidad de los ET* en el periodo 1997-2018, a nivel municipal



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, los registros a nivel estatal señalan que la letalidad mínima es de 1 defunción por cada 1,000 ET, que el promedio es de 4 y el número máximo es 14. Desde luego, algunas entidades exhiben mucha variabilidad y un rango muy amplio, lo que se debe principalmente a sus sistemas de registro o a periodos señalados por un incremento inusual de las defunciones por ET, observado principalmente en el Estado de México durante el periodo 2007-2011, aunque otras entidades como Baja California, Aguascalientes, Oaxaca, Puebla y Michoacán también muestran fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo.

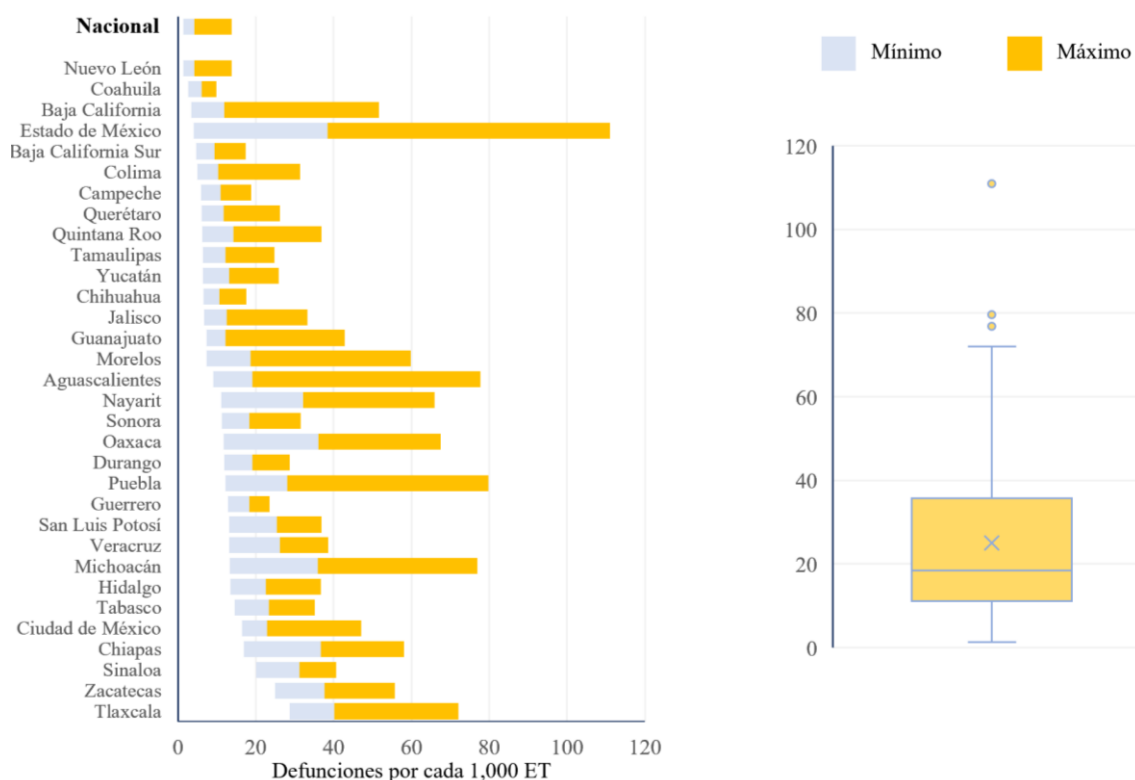
Para analizar cuántas defunciones ocurren por *ET-Fatal* y complementar los datos de registro, se vuelve necesario el diseño de un ajuste al indicador de la letalidad que permita identificar la intensidad del fenómeno. En este sentido, analizar los valores mínimos y máximos registrados con sus respectivos intervalos de distancia puede ayudar a valorar la calidad de los datos en cuestión y cómo los registros podrían estar fluctuando debido a una mayor varianza a la exhibida por el fenómeno.

En la Figura 2.59 se presenta una gráfica de barras con los valores de letalidad mínimos, máximos y medios de cada entidad federativa durante el periodo 1997-2018, en la que se observan estos datos y el rango de variación de la letalidad de los ET durante el periodo 1997-2018, a nivel estatal.

Como puede verse, la letalidad mínima observado a nivel nacional fue de 1 defunción por cada 1,000 ET, la media fue de 4 y el máximo fue de 14 muertes por cada 1,000 ET. Sin embargo, en algunas

entidades la letalidad asciende a proporciones de altas consecuencias, por ejemplo, en Tlaxcala el mínimo es de 29, la media de 40 y la máxima registrada es 72 defunciones por cada 1,000 eventos. Un caso extremo de variabilidad que es necesario investigar refiere al Estado de México, en donde el mínimo es de 4, la media de 38 y la estimación máxima lleva a 111 defunciones por cada 1,000, es decir 11 de cada 100 eventos producen un muerto, lo que además de ubicarlo como el estado más letal, señala una variabilidad en los registros estatales que difícilmente podrían observarse en el fenómeno sin un cambio estructural dramático, lo que motiva una enorme desconfianza en la veracidad de los datos y la calidad e integridad de los registros.

Figura 2.88. Rango de variación estatal de la Letalidad de los ET en el periodo 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, los análisis posibles con las herramientas desarrolladas en ese segundo capítulo son múltiples y coloca los cimientos de los modelos posteriores con base en diversas definiciones y análisis que permiten contar con un panorama de los eventos de tránsito en México durante el periodo 1997-2018 con cierto nivel de detalle.

El uso de los principios actuariales para la modelación estocástica establece también un marco de referencia que permitirá una secuencia apropiada de los avances teóricos en este ámbito y posibilita el uso de un marco estadístico orientado a establecer hipótesis científicas. Asimismo, la definición de los procesos estocásticos y sus propiedades aplicadas al estudio de los ET permite estudiar las variables

de frecuencia y severidad como funciones que estiman la distribución de las probabilidades de ocurrencia de eventos y magnitudes, así como su evolución espacial y temporal en el territorio mexicano mediante razones que permiten cuestionar la verosimilitud de ciertos registros en función de sus valores pasados y futuros.

Sin embargo, la contribución más importante de los modelos en este apartado es que permite redefinir conceptos conocidos como frecuencia, incidencia, oportunidad relativa y letalidad en forma intuitiva sin renunciar al rigor de las posibilidades de estimar las probabilidades de transición, calcular tendencias y realizar pronósticos con bandas de desviación con base en evidencias. La combinación de métricas y técnicas de visualización estadística y cartográfica da cuenta de cómo el relacionamiento de una geodatabase con procedimientos estadísticos estándar puede ayudar a simplificar el procesamiento de bases de datos —cabe recordar que se cuenta con casi 9 millones de eventos registrados y que cada uno posee 45 datos asociados de origen y 73 más de procesamiento, lo que lleva a mil millones de registros (1×10^9), un reto computacional que ya resulta considerable—, lo que ha planteado el desafío de desarrollar álgebra computacional expreso para procesar este conjunto informativo en tiempos relativamente cortos.

Como una de las aplicaciones del modelo propuesto, se planteó una métrica inédita para estimar el análisis de los tiempos entre ocurrencias, lo que puede complementarse con análisis de perfiles de personas con el fin de establecer acciones que permitan modificar las dinámicas que fomentan eventos que terminan en defunciones. Asimismo, las métricas ajustadas para estimar las oportunidades relativas y sus variaciones ayudan a identificar la presencia de periodos de inestabilidad de las series o cambios de tendencia que podrían ser posibles en el mundo real, pero que poseen muy pocas probabilidades de ocurrencia, lo que resulta de enorme interés práctico para estimar el impacto de ciertas intervenciones que pudieran converger a la idea de que los valores observados se traducen en una disminución de ET fatales y, por lo tanto, concluir que se han salvado vidas.

A partir de estos fundamentos teóricos, ahora es posible avanzar hacia la estimación de propiedades más detalladas de los registros asociados con las discordancias de tránsito y caracterizar distintos grupos poblacionales, comenzando por una desagregación con base en la edad de los involucrados.

Capítulo 3

Riesgo y dinámica poblacional

‘A partir de cierto punto no hay retorno.

Ese es el punto que hay que alcanzar’

Franz Kafka. *El proceso* (1925)

En el capítulo anterior se mostró el estado del arte en el análisis macro de la distribución y evolución espacial y temporal de los ET, así como las ideas que dan origen a este modelo y sus métodos de estimación, coadyuvando al cambio en su paradigma de estudio. En este capítulo se profundiza en la modelación de los ET y la forma en que afectan a las poblaciones, para lo cual se introduce el formalismo matemático que permite estudiar a la configuración de los procesos de riesgo que conducen a la mortalidad por ET desde un marco estocástico, lo que se enfoca en analizar la distribución de los eventos dentro de las distintos grupos de población, la edad de los involucrados y la causa de la defunción, todo a través de herramientas conceptuales y analíticas que permiten estimar los tiempos de latencia y el tiempo potencial de vida perdido por una persona debido a un ET como parte de una pérdida socialmente distribuida que puede equipararse entre distintos grupos de edad.

De este modo, el objetivo central de este capítulo es consolidar los conceptos y la notación de la adaptación del modelo actuarial de la mortalidad y supervivencia mediante una extensión generalizada que provea de métodos analíticos y estadísticos para estimar las probabilidades de ocurrencia, en particular aquellas que se encuentran asociadas con la exposición e intensidad de los diversos modos en que se acumula el riesgo de defunción por ET; así como ponderar las brechas observadas ante

distintas condiciones de vulnerabilidad, lo cual incluye parámetros de espacio y tiempo para dar sustento a un modelo específico en el que las discordancias de tránsito producen diferentes clases de riesgo que se materializan en cada uno de los individuos de la población expuesta, siendo su ocurrencia condicionada por las características territoriales, los atributos de los colectivos y los rasgos individuales de las personas que sufren las consecuencias de los eventos de tránsito.

3.1 Privación de la vida

Para conocer las propiedades de distribución de las edades de los involucrados, es necesario realizar las estimaciones de las frecuencias relativas de las defunciones por ET sobre la estructura poblacional de una delimitación territorial dada. Con base en los primeros cálculos, es posible obtener estimaciones insesgadas de las probabilidades totales y condicionadas de cada evento en distintos grupos poblacionales y realizar hipótesis sobre la ley de distribución que le subyace, lo que a su vez abre una enorme ventana de oportunidades para modelar las magnitudes de frecuencia y severidad de los ET, y sus variaciones a través del tiempo y el espacio.

Con el fin de hacer operativo el planteamiento de hipótesis estadísticas y realizar análisis inferencial sobre los distintos tipos de ET, así como aplicarlo al contraste de las fuerzas que afectan colectivos de personas con distintas edades, se vuelve útil agrupar y estandarizar los datos de aquellos grupos de población sobre los que se posee información en un tiempo y espacio concreto. En este sentido, las técnicas de consolidación de bases de datos y los métodos de pronóstico de series de tiempo se vuelven especialmente valiosos, ya que algunos algoritmos requieren de matrices de datos que involucran la evolución de todas las cohortes, un procedimiento que para el año 2018 —el más que posee las cifras más recientes y, por tanto, el último de las series—, implica un horizonte temporal que llega hasta el año 2100 y que involucra diversas acciones de *futurología*²⁶, ya que México cuenta con proyecciones solo hasta 2050, lo que invita a asumir diversas hipótesis de estacionariedad en las series dentro de los modelos estocásticos que subyacen a las proyecciones.

Dado que los ET son realizaciones observables de los riesgos latentes que se encuentran presentes en el territorio en un tiempo específico, y que estos se encuentran acotados por un territorio con condiciones materiales y sociales que afectan y condicionan a los distintos grupos poblacionales, se requieren ecuaciones funcionales que permitan analizar diversas propiedades de los ET y su evolución temporal, para lo cual es indispensable realizar el análisis sobre el tamaño de población y su evolución

²⁶ Un término acuñado en las ciencias sociales para referirse al estudio de las tendencias actuales para pronosticar desarrollos futuros. Si bien los aspectos especulativos y descriptivos de la futurología se remontan a las tradiciones de la literatura utópica y la ciencia ficción, la metodología del campo se originó en el ‘pronóstico tecnológico’ desarrollado cerca del final de la Segunda Guerra Mundial (James Joseph O’Toole, 2019).

dinámica, por grupos etarios en los diversos niveles de desagregación de interés, lo que se logra a partir de las siguientes definiciones.

Definición 3.44. Para cierto horizonte temporal T sobre el conjunto espacial ε y el tiempo t , el radix de $\Pi_{\alpha(\alpha+t)}(\varepsilon)$, denotado por $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ y es el valor inicial de la cohorte que inició en el tiempo t , es decir, la población en edad α , estudiada sobre ε y que se encuentra expuesta a un conjunto de riesgos que ofrece la interacción entre el contexto y sus propias características de vulnerabilidad, en el tiempo $(\alpha + t)$.

De este modo, la familia $\{\Pi_{0_t}(\varepsilon)\} = (\Pi_{0_{t_1}}(\varepsilon), \Pi_{0_{t_2}}(\varepsilon), \dots, \Pi_{0_{t_n}}(\varepsilon))$ indica los valores iniciales de un conjunto de cohortes de interés y denota el total de personas menores de 1 año que se encuentran vivas durante el año indicado —típicamente a mitad del año— para los años indizados por t_1, t_2, \dots, t_n y en donde $E[\Pi_{0_{t_i}}(\varepsilon)] = \pi_{0_{t_i}}(\varepsilon) \forall t$.

Definición 3.45. Para un conjunto espacial ε y sobre el tiempo t , con radix $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$, es posible realizar una partición del total $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ en grupos de edad $[\alpha_i, \alpha_j]$, denotados por $g_{\alpha+k(\beta), \alpha+(k+1)\beta}$, tal que

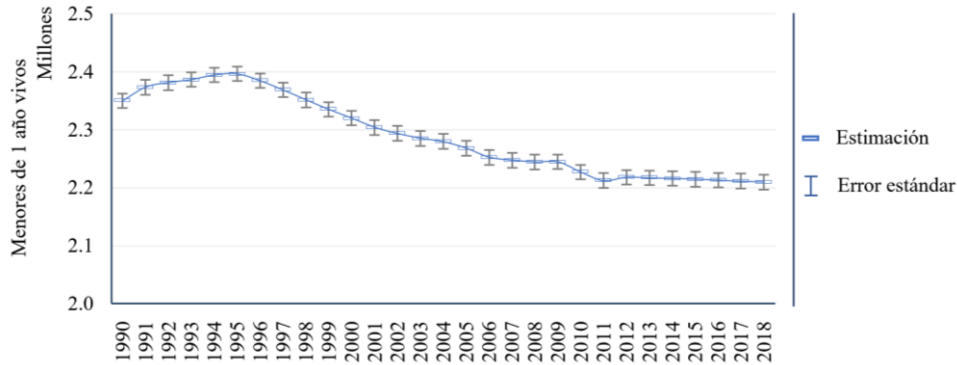
$$\Pi_0(\varepsilon) = \sum_{\beta=0}^{\infty} g_{\alpha}(\varepsilon) + g_{\alpha+k(\beta), \alpha+(k+1)\beta}(\varepsilon) \quad (3.1)$$

En donde el pivote inicial α es la edad hasta la que se acota el primer grupo $g_{\alpha}(\varepsilon)$ y β es el ancho del intervalo de edad bajo el que se da la agrupación y k es el contador de la suma que produce la partición.

En la Figura 3.1 se observa la evolución temporal de las cifras de inicio de las cohortes durante el periodo 1990-2018. Como se ha visto, en la historia de México se registró un crecimiento sostenido de la natalidad que produjo un inmenso bono demográfico —entendido como la fuerza de trabajo adicional motivada por una composición poblacional con una mayoría de personas jóvenes (Nasir, J. & Tahir, M., 2011). No obstante, esta dinámica solo se mantuvo hasta 1995 —año en el que alcanzó su pico más alto con una tasa de 45 recién nacidos cada 10 minutos—, pues en este año comenzó una nueva tendencia decreciente en el número de nacimientos.

A partir de 1996 en la tasa de natalidad mostró una variación promedió de -0.5% hasta 2012, la cual es bastante más pronunciada que en los años subsecuentes (-0.1%), provocando una caída acumulada de 7.8% respecto a 1995, lo que también marcó la etapa final del bono demográfico.

Figura 3.89. Evolución de los menores de 1 año durante el periodo 1990-2018

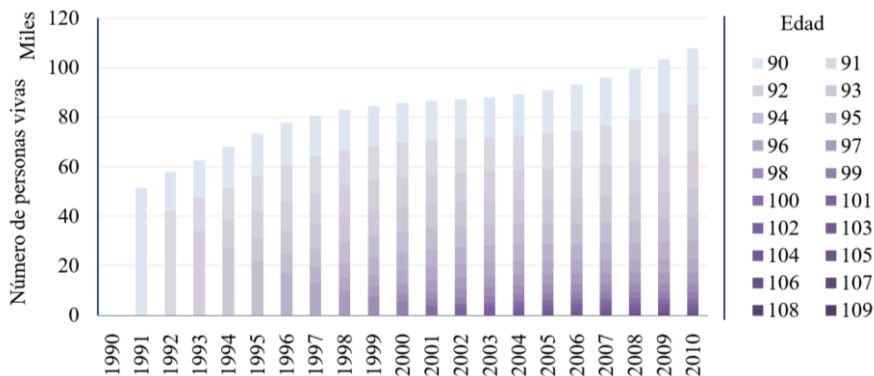


Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Definición 3.46. Para cierto horizonte temporal Γ sobre el conjunto espacial ε y el tiempo t , ω denota el tiempo límite de vida de una persona de la población dada por la cohorte $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$, por lo que es el mayor valor posible de α sobre ε , a partir del tiempo t , lo que indica el tiempo de fallecimiento de la última persona de su cohorte tal que $\Pi_{\omega_t}(\varepsilon) = 0 \forall t$.

En la Figura 3.2 se observa la evolución de la edad límite ω y cómo ésta ha ido incrementando a lo largo de los años en México. Por ejemplo, aunque fue hasta 1991 que se tuvo registros oficiales de personas en edad 90 o superior —con un total de 133,855—, en los años subsiguientes se fue aumentando la longevidad y la cantidad de personas que alcanzan esta edad, lo que ha continuado aumentando hasta llegar a 264,473 en 2010, lo que se atribuye a una mejora en las condiciones sanitarias y su traslado en el incremento de las expectativas de vida en toda la población.

Figura 3.90. Evolución de la edad ω durante el periodo 1990-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, los valores del radix y edad límite se constituyen en parámetros de orden que impactan al sistema directamente y ayudan a modular las dinámicas poblacionales posteriores; incluso en la

magnitud y variaciones de los nacimientos y defunciones, lo que sugiere estudios comparativos que detallen la dinámica demográfica y su impacto en la mortalidad subsecuente. En este sentido, en el capítulo 2 se definieron las variables asociadas a las defunciones totales y la notación para distinguir a las distintas consecuencias sobre el binomio dado por el espacio ε y el periodo de tiempo t , lo que aquí se retoma en la mayoría de las estimaciones.

Definición 3.47. El número total de *defunciones* de personas con edad α en un espacio ε y en el tiempo t , es un proceso de conteo que puede ser continuo o discreto en el tiempo y está dado por la colección de VA $\{\mathbb{D}_\alpha(\varepsilon; \tau) = \mathbb{D}_{\alpha_\tau}(\varepsilon) \in \mathbb{N} \cup \{0\} \forall \tau \text{ y } \varepsilon\}$, que refiere a las personas fallecidas en edad α sobre el espacio ε durante el periodo de tiempo $\tau \in [\beta_0, \beta_1)$, con $\beta_0, \beta_1 < 1$. Su esperanza está dada por $E[\mathbb{D}_{\alpha_\tau}(\varepsilon)] = \mathbb{d}_{\alpha_\tau}(\varepsilon)$ y posee una función de densidad $f_{\mathbb{D}_\alpha}(\varepsilon, \tau)$ sobre el conjunto acotado por el binomio paramétrico (ε, τ) , para lo cual se cumple:

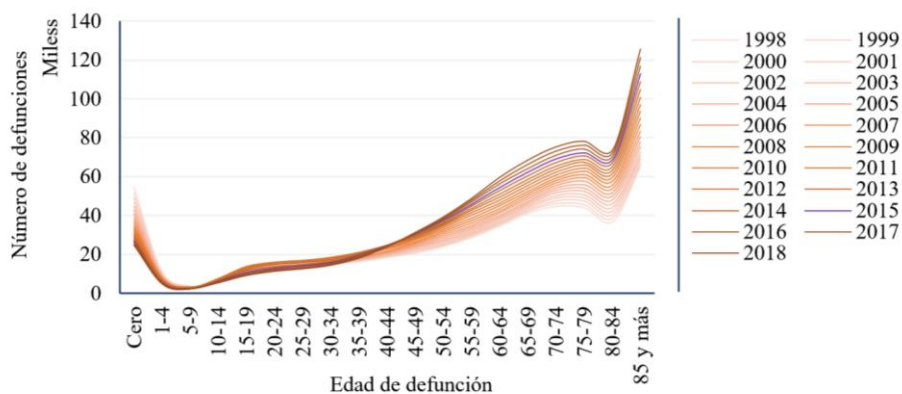
$$\mathbb{D}(\varepsilon, \tau; \alpha) = \mathbb{D}_\alpha(\varepsilon, \tau) = \mathbb{D}_{\alpha_\tau}(\varepsilon) = \int_{\beta_0}^{\beta_1} f_{\mathbb{D}_\alpha}(\varepsilon, t) dt \quad (3.2)$$

Por lo que la esperanza del proceso al tiempo $\tau \in [\beta_0, \beta_1)$

$$E[\mathbb{D}_{\alpha_\tau}(\varepsilon)] = \int_{\beta_0}^{\beta_1} t f_{\mathbb{D}_\alpha}(\varepsilon, t) dt = \mathbb{d}_{\alpha_\tau}(\varepsilon) \quad (3.3)$$

En la Figura 3.3 se muestra la evolución del número de defunciones por todas las causas en México durante el periodo 1998-2018.

Figura 3.91. Evolución del número de defunciones en México por grupo de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, el color graduado obedece a la progresión en el tiempo y señala tres fenómenos centrales:

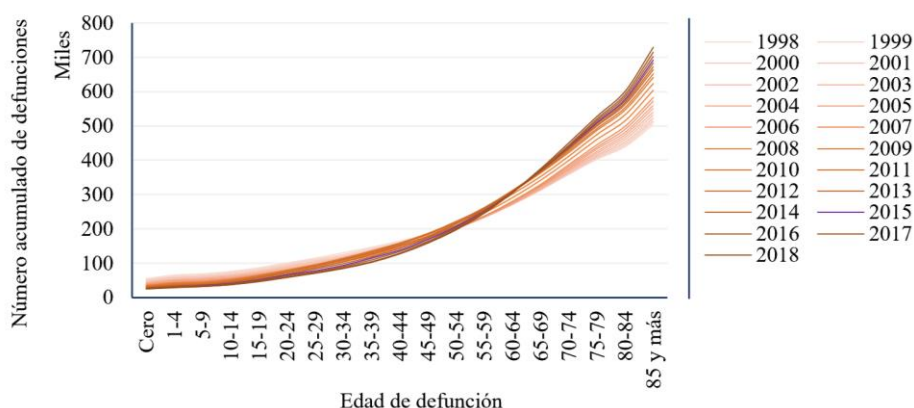
1. Que las defunciones de los menores de 1 año han disminuido 69% en dos décadas, pasando de 10.8% del total de defunciones registradas, a 3.4%.

2. Una disminución de 55% en el número de fallecimientos de menores de 5 años, que pasó de 65,456 defunciones en 1998 a 29,437 en 2018
3. El aumento progresivo de defunciones en los grupos de personas mayores a 40 años, que registra un aumento de 175%, pasando de 358,070 defunciones en 1998 a 625,340 en 2018.

En la Figura 3.4 se presenta el número acumulado de defunciones en México por todas las causas durante el periodo 1998-2018, lo que complementa la información previa y muestra cómo han variado el número de defunciones en México a lo largo del tiempo hasta alcanzar un aumento de 44%, pasando de 504,472 en 2018 a 728,507 en 2018.

Como se puede observar, la enorme disminución en la mortalidad durante los primeros años logra que mantener estable el número de defunciones hasta la edad 60 y después desencadena una gran cantidad adicional de fallecimientos, lo que supone un reto de gestión enorme, tanto para el sistema de salud como para la sociedad en su conjunto.

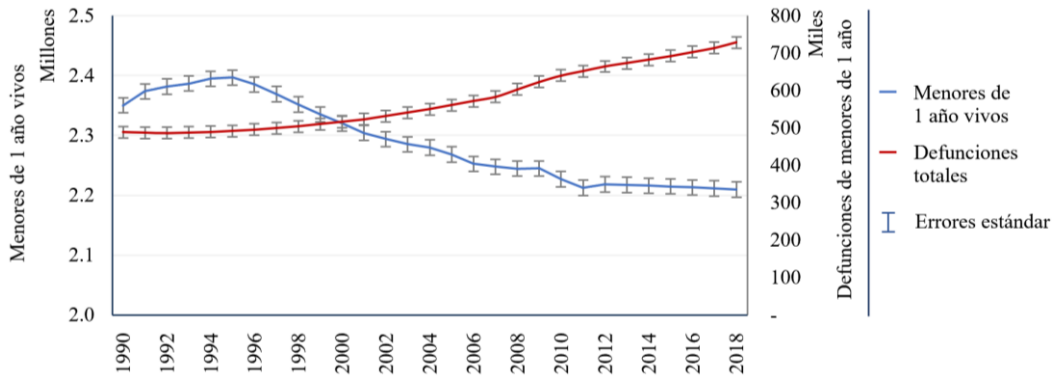
Figura 3.92. Evolución del número acumulado de defunciones en México por grupo de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para complementar la información, la Figura 3.5 muestra la evolución de los nacimientos y defunciones de los menores de un año durante el periodo 1990-2018, como puede verse, a pesar del incremento en el número de defunciones, el saldo total de nacimientos versus defunciones totales es positivo ya que los valores absolutos de los menores a 1 año superan por mucho a las defunciones, un ratio que en 1998 fue de 48 por cada 10 defunciones y que se ha reducido en 35% para quedar en 3 por cada muerte en el año 2018.

Figura 3.93. Evolución del número total de defunciones y de los menores de 1 año vivos, 1990-2018

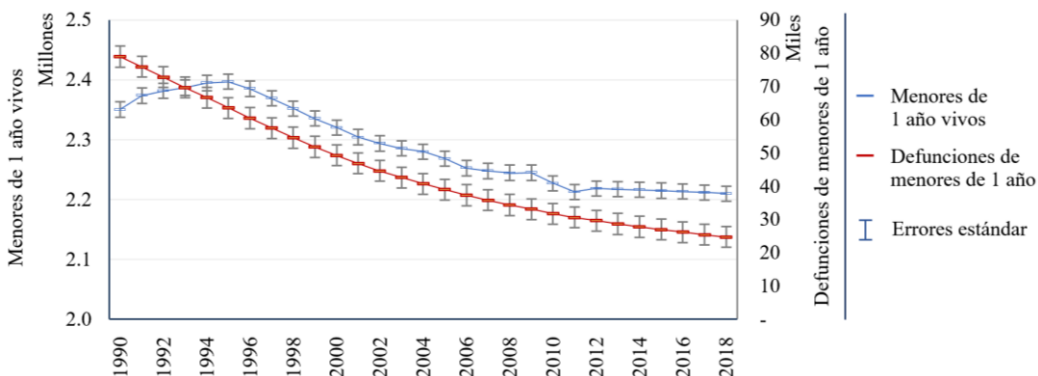


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otro rasgo relevante de la mortalidad que es sumamente relevante es el efecto de la mortalidad en los primeros años, especialmente en su impacto en la dinámica poblacional. En la Figura 3.6 se observa cómo han ido disminuyendo las defunciones de los menores de 1 año a lo largo del tiempo, pasando de 78,995 defunciones en 1990 a 24,772 en 2018, lo que representa un decremento de 69%. Este claro fenómeno de mejora social motivada por una mejor atención en la salud posee altas probabilidades de permanecer con una tendencia negativa en las defunciones durante los siguientes años, lo que se explica fácilmente a partir de los avances tecnológicos y la mejora en las condiciones de acceso y atención a los servicios sanitarios.

Por su parte, también es un hecho demográfico relevante la inflexión en la cantidad de menores de 1 año vivos y cómo, a pesar de que, en general, existe una mortalidad menos intensa en la niñez, el número de nacimientos decrece sostenidamente a través del tiempo.

Figura 3.94. Evolución del número de menores de 1 año vivos y de sus defunciones, 1990-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como parte de la extensión de la notación establecida, se define ahora a las defunciones por ET a partir de sus propias variaciones, lo que simplifica su lectura y las operaciones analíticas, algebraicas y de cálculo conforme a lo siguiente:

Definición 3.48. El número de defunciones de personas con edad α producidas por ET sobre el espacio ε y durante el periodo de tiempo $\tau \in [\beta_0, \beta_1)$, con $\beta_0, \beta_1 < 1$, se denota por $\mathcal{D}_{\alpha\tau}(\varepsilon)$ y se estima por

$$\mathcal{D}(\varepsilon, \tau; \alpha) = \mathcal{D}_{\alpha}(\varepsilon, \tau) = \mathcal{D}_{\alpha\tau}(\varepsilon) \quad (3.4)$$

Por lo que la esperanza del proceso al tiempo $\tau \in [\beta_0, \beta_1)$

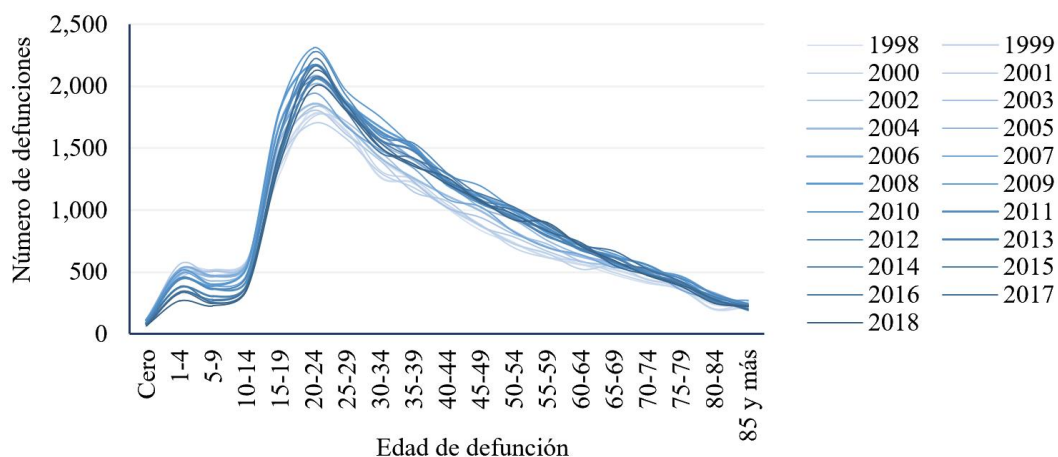
$$E[\mathcal{D}_{\alpha\tau}(\varepsilon)] = \int_{\beta_0}^{\beta_1} t f_{\mathcal{D}_{\alpha}}(\varepsilon, t) dt = d_{\alpha\tau}(\varepsilon) \quad (3.5)$$

A partir de las ecuaciones anteriores es posible generar una tabla con las estimaciones de probabilidades mediante los registros de ET que contienen las edades de los sujetos involucrados en un periodo y espacio específico. Dicha información reflejará una población hipotética con cohortes de individuos de la misma edad α y su historia subsiguiente de participación en eventos de tránsito.

A partir de estos conjuntos de datos es posible estimar las probabilidades asociadas a diversas características de interés que ya hayan sido registradas en la fuente de datos, o bien sugerir nuevas fuentes informativas, para lo cual también se podría emplear ecuaciones prospectivas del cálculo actuarial y vincularlas con la notación desarrollada con el fin de realizar estimaciones financieras sobre el impacto contingente de los ET en la sociedad y en los sistemas de salud, pensiones y previsión.

Por ejemplo, en la Figura 3.7 se muestran las distribuciones de las frecuencias absolutas de la familia de variables $\{\mathcal{D}_{\alpha\tau}(\varepsilon)\} t \in [1998, 2018]$, en la cual se puede apreciar el desplazamiento de las curvas a lo largo de los años y cómo se va modificando su dinámica en el tiempo, disminuyendo el número de defunciones entre los más jóvenes y aumentando en todas las demás edades. La clara dominación de los jóvenes entre 15 y 29 años permite evaluar la dimensión del problema y cómo este afecta anualmente a los sistemas de salud basados en esquemas de aportación individual.

Figura 3.95. Distribución de las defunciones por ET en función de los grupos de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Para complementar la información, la Tabla 3.1 muestra los cambios en el número de defunciones por grupos quinquenales a través del tiempo. Resulta notable que los grupos de edad entre 0 y 14 años disminuyen gradualmente hasta reducirse en 45.5% —de 1,682 a 916—, siendo el grupo de 5 a 9 el de mayor reducción (-56.2%), seguido del de 1 a 4 (-44.9%), del de 10 a 14 (-40.5%) y del de menores de 1 año (-19.8%), lo que sugiere estudiar las medidas que han fomentado éstos resultados y si es posible considerarlos como un producto de las estrategias de prevención.

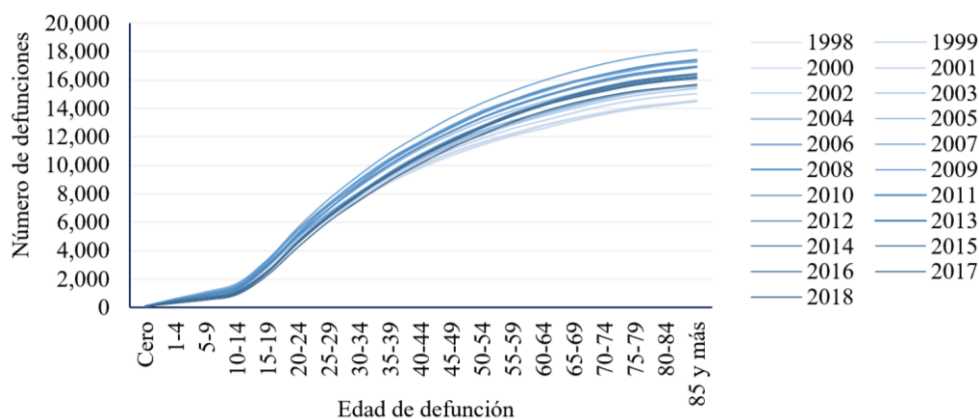
Tabla 3.3. Distribución de las defunciones por ET en los años 1998, 2003, 2008 y 2018

Edad de defunción (años)	1998	2003	2008	2013	2018	Diferencia porcentual 1998-2018
Cero	86	98	112	86	69	-19.8%
1-4	486	474	443	378	268	-44.9%
5-9	520	506	386	303	228	-56.2%
10-14	590	570	541	393	351	-40.5%
15-19	1,296	1,485	1,807	1,432	1,378	6.3%
20-24	1,829	1,833	2,172	2,051	1,994	9.0%
25-29	1,628	1,710	1,874	1,852	1,797	10.4%
30-34	1,403	1,475	1,668	1,568	1,504	7.2%
35-39	1,232	1,226	1,508	1,479	1,374	11.5%
40-44	1,014	1,019	1,205	1,223	1,212	19.5%
45-49	837	940	1,109	1,062	1,076	28.6%
50-54	731	808	986	938	922	26.1%
55-59	646	727	816	793	900	39.3%
60-64	567	587	711	686	710	25.2%
65-69	480	557	561	620	592	23.3%
70-74	411	504	510	486	473	15.1%
75-79	367	391	465	411	384	4.6%
80-84	235	292	321	254	250	6.4%
85 y más	247	198	241	228	222	-10.1%
Nacional	14,795	15,552	17,585	16,492	16,035	8.4%

Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Como también se mostró en el capítulo 2, en 1998 hubo 14,795 defunciones por ET, cifra que aumentó a 16,035 (8.4%) en 2018.

Figura 3.96. Número acumulado de defunciones por ET por grupos de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

No obstante, como puede observarse en la distribución acumulada de la Figura 3.8, el periodo 2008-2012 ha mostrado las mayores severidades, redistribuyendo la disminución de las muertes por esta causa en los primeros años de vida entre la población más joven. Con el fin de comparar los cambios relativos en las defunciones entre los grupos a lo largo del tiempo, resulta de interés sus funciones de densidad y distribución con el fin de resolver el siguiente planteamiento:

$$\begin{aligned}
 E[\mathcal{D}_\tau(\varepsilon)] &= \sum_{\alpha=0}^{\omega} E[\mathcal{D}_{\alpha_\tau}(\varepsilon)] = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \int_{\beta_0}^{\beta_1} t f_{\mathcal{D}_\alpha}(\varepsilon, t) dt \\
 &= \sum_{\alpha=0}^{\omega} d_{\alpha_\tau}(\varepsilon) = d_\tau(\varepsilon)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

De tal forma que la frecuencia relativa de las defunciones de personas en edad α , $d_{\alpha_\tau}(\varepsilon)$, respecto al total de defunciones ocurridas en el espacio ε y en el año t , está dada por

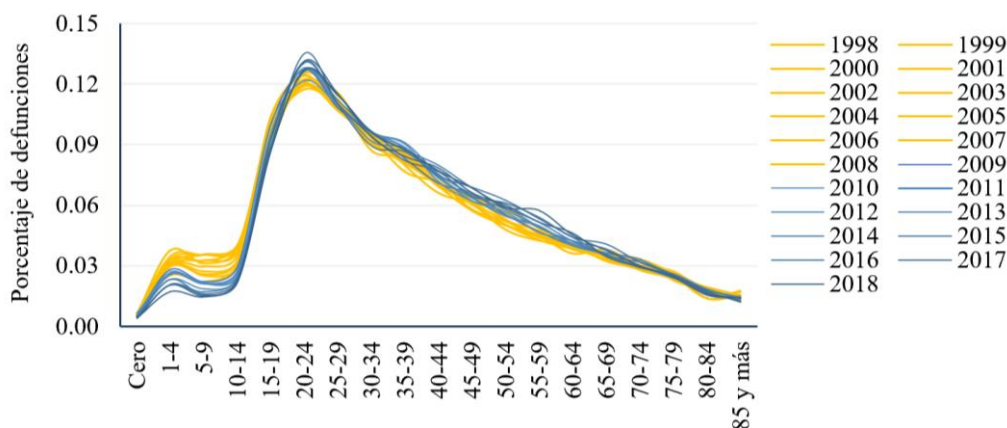
$$f_{\mathcal{D}_\alpha}(\varepsilon, t) = \frac{d_{\alpha_\tau}(\varepsilon)}{d_\tau(\varepsilon)}
 \tag{3.7}$$

Tal que

$$= \sum_{\alpha=0}^{\omega} f_{\mathcal{D}_\alpha}(\varepsilon, t) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \frac{d_{\alpha_\tau}(\varepsilon)}{d_\tau(\varepsilon)} = 1
 \tag{3.8}$$

Las ecuaciones 3.7 y 3.8 permiten comparar en forma normalizada las distintas distribuciones de probabilidad de defunción por ET en función de la edad a través del tiempo, permitiendo reconocer los cambios cualitativos y cuantitativos en un marco estandarizado, un resultado que podría proveer de una solución a un asunto que hasta este momento no se ha logrado resolver ni acordar: **¿a partir de qué estimaciones se debe evaluar el cumplimiento de las metas de los ODS?** Una pregunta que aún no cuenta con una respuesta concreta, ni para los sistemas de monitoreo, ni para la rendición de cuentas.

Figura 3.97. Distribución de las probabilidades de defunción por ET por grupo de edad, 1998-2018

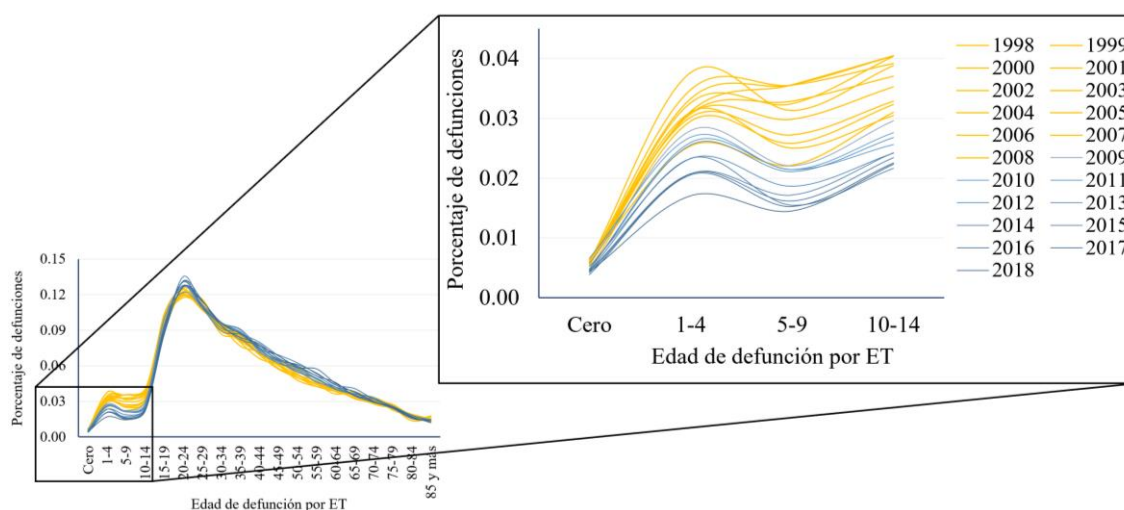


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 3.9 se observa una familia de distribuciones similares a la dada por los valores absolutos de las defunciones, solo que ésta permite estimar en forma apropiada la magnitud del cambio al presentar las variaciones proporcionales respecto al total de defunciones.

Un ejemplo de la mejora en la precisión se observa al realizar un acercamiento al intervalo de edades entre 0 y 14 años como en la Figura 3.10, en la cual se puede observar que la frecuencia relativa de las defunciones por ET en este grupo etario ha disminuido 49% en el grupo de 1 a 4 años, 59% en el de 5 a 9 y 45% en el de 10 a 14 años, lo que refleja un cambio muy significativo en la protección de la vida de los menores y se traduce directamente en

Figura 3.98. Distribución de las probabilidades de defunción por ET, grupo de 0 a 14 años, 1998-2018

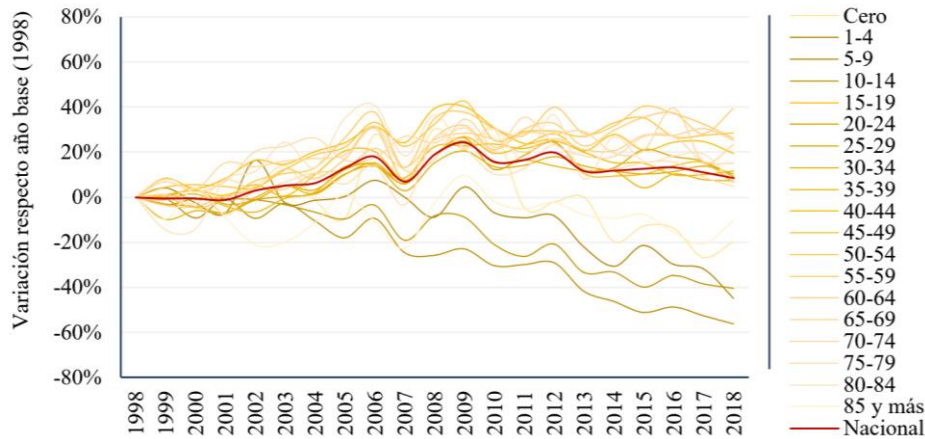


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Además, como muestra la Figura 3.11, aunque las variaciones en las defunciones respecto al año base presentan oscilaciones, las tendencias son bastante marcadas en el largo plazo, lo que confirma que las disminuciones solo se presentan en el grupo de 1 a 14 años y estas son incipientes, lo que contrasta con la evolución general de los demás grupos etarios y anticipa que las metas generales de los ODS están aún lejos de cumplirse.

Hasta este punto, ya se ha logrado caracterizar el fenómeno de las defunciones y sus variaciones a través del tiempo, por lo que es posible realizar análisis más detallados. En este sentido, como se ha demostrado, al tratar a los datos de defunciones como series de tiempo, es posible realizar pronósticos sobre su evolución con el fin de realizar análisis prospectivo y generar escenarios condicionados, algo que CONAPO ya realiza mediante el proyecto *Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050* y *Conciliación Demográfica de México, 1950 -2015*, cuyos resultados son públicos con distintos niveles de desagregación.

Figura 3.99. Variación interanual de las defunciones por ET por grupo de Edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de lo anterior, para usar la información producida y liberada por CONAPO, solo hace falta ampliar la notación sobre el mismo modelo —extendiendo la hipótesis de estacionariedad débil sobre la distribución de la población respecto a la edad en las estimaciones posteriores— con el fin de estimar las probabilidades de supervivencia ante distintos horizontes temporales.

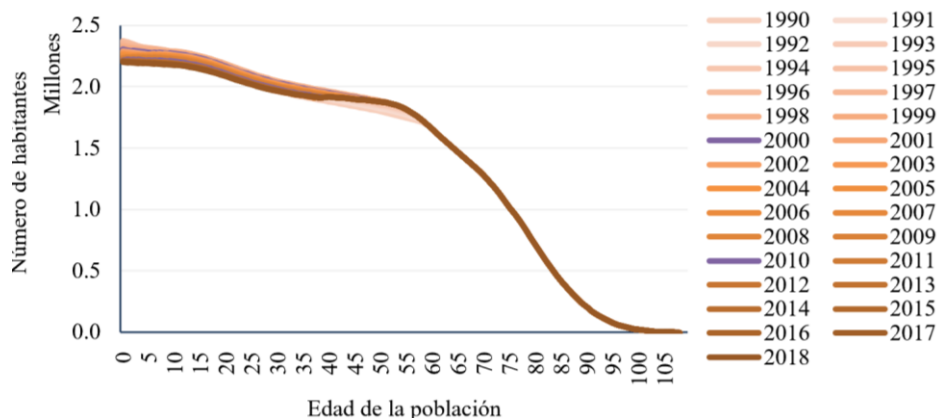
Definición 3.49. El número de personas en un espacio ε , representado por $\Pi_{(\alpha+n)t+\alpha+n}(\varepsilon)$ con esperanza $E[\Pi_{(\alpha+n)t+\alpha+n}(\varepsilon)] = \pi_{(\alpha+n)t+\alpha+n}(\varepsilon)$ y que tenían edad α en el año $t + \alpha$, se denominan supervivientes de la cohorte Π_{0t} a la edad $(t + \alpha + n) \forall t, \alpha, n > 0$.

En general, el número $\pi_{\alpha t+n}(\varepsilon)$, que refiere a las personas de edad α en el tiempo $(t + n)$ es distinto de $\pi_{(\alpha+n)t}(\varepsilon)$, que refiere a las personas en edad $(\alpha + n)$ en el tiempo t . Sin embargo, algunas veces, bajo la hipótesis de poblaciones estacionarias, pueden ser aproximadas y servir como ‘coordenadas equivalentes’ para estimar probabilidades de supervivencia y muerte con el fin de estimar la evolución de las cohortes dadas por $\{\Pi_{\alpha t_1+\alpha}(\varepsilon)\}, \{\Pi_{\alpha t_2+\alpha}(\varepsilon)\}, \dots, \{\Pi_{\alpha t_n+\alpha}(\varepsilon)\}$ con $\alpha \in [0, \omega)$, e iniciadas por la serie de nacidos vivos $\Pi_{0t_1}(\varepsilon), \Pi_{0t_2}(\varepsilon), \dots, \Pi_{0t_n}(\varepsilon)$, para los respectivos tiempos $t_1, t_2, \dots, t_n, \forall t_k > 0$.

En la Figura 3.12 se muestra la evolución en el tiempo de las cohortes nacidas durante los años 1990-2018. De acuerdo con los registros, las personas nacidas a partir de 1990 podrían llegar vivas a la edad de 109 años, que como ya se ha señalado, en la práctica implica realizar estimaciones hasta el año 2100. Dado que CONAPO solo ha publicado datos hasta 2050 y los últimos valores de la serie parecen ser estacionarios —algo que muy probablemente se debe al método de estimación—, a las series subsecuentes se les considerará estacionarias respecto al 2050.

Como puede verse en las curvas de supervivencia, el número de menores de 1 año desciende gradualmente, mientras el número de supervivientes a edad 40 comienza a ser mayor para las cohortes más recientes, lo que al alcanzar la edad 58 converge a valores similares —como producto de la hipótesis de estacionariedad—, año en el que se inicia un ritmo acelerado de aumento en el número de defunciones, lo que probablemente comenzará a ocurrir en la década del 2040 para las primeras cohortes.

Figura 3.100. Evolución de la acumulación de las defunciones por cohorte, 1990-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

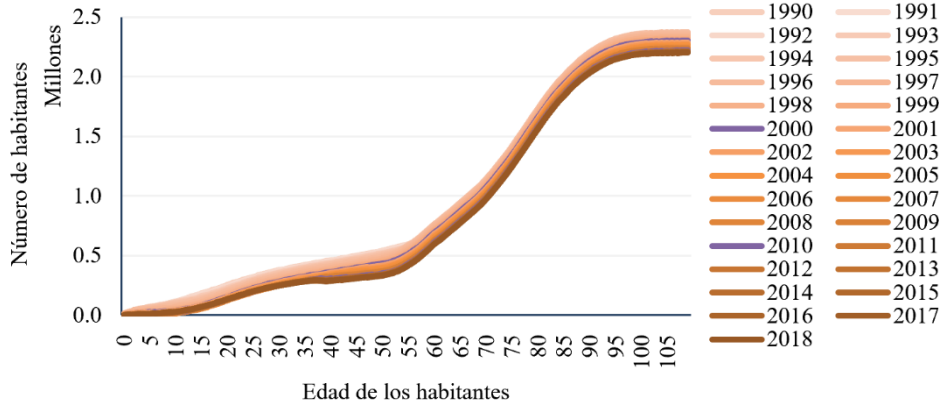
Desde luego, a partir de estos resultados se vuelve posible la estimación de probabilidades de defunción y supervivencia a periodos mayores a un año, lo que demanda ampliar las definiciones mediante la misma notación.

Definición 3.50. El número de defunciones de personas en edad α en el año t , dentro de los siguientes n años sobre el espacio ε y que pertenecían a la cohorte, están dados por

$${}_n d_{\alpha_t}(\varepsilon) = {}_n d_{\alpha_t}^{(r)}(\varepsilon) = \pi_{\alpha_t}(\varepsilon) - \pi_{(\alpha+n)_{t+n}}(\varepsilon) \quad (3.9)$$

Para conocer la dinámica de supervivencia de las personas a un ET es útil definirla como el resultado de un suceso contingente con consecuencias medibles, aceptando que son imposibles de determinar a priori y por lo que la severidad de cada caso individual solo puede estimarse mediante probabilidades condicionales de supervivencia y muerte. Con el objeto de reconocer cómo es la evolución de las defunciones para las distintas cohortes, en la Figura 3.13 se muestra el número acumulado de defunciones por cohorte para el periodo 1990-2018 sobre el horizonte temporal de 2099.

Figura 3.101. Evolución de la acumulación de defunciones en las cohortes 1990-2018



Fuente:

Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la misma figura se observa que las distribuciones son muy similares entre sí, pero las más recientes —representadas mediante las líneas en colores más oscuros— se encuentran más abajo en la escala debido a que los valores iniciales son también menores, lo que se explica a través de la disminución de los nacimientos experimentada en los últimos años. En este sentido, se verifica que el número de difuntos en los primeros años es bastante menor y que en el intervalo de edad 30-58 existe un número muy pequeño de defunciones, por lo cual la curva es casi plana en ese intervalo, lo que podría corroborarse mediante el análisis de tendencia de las frecuencias relativas, lo que es sumamente útil cuando se analizan causas específicas.

Definición 3.51. La VA $\mathbb{A}_t(\varepsilon)$ representa la edad en que fallece una persona nacida en el año t —de la cual se dice que pertenece a la cohorte del año t dada por $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ —, definida sobre el espacio ε y en el año t , la cual satisface dos hipótesis generales:

- i. la realización de la variable aleatoria $\mathbb{A}_t(\varepsilon)$ es observable, y
- ii. puesto que $\mathbb{A}_t(\varepsilon)$ denota el tiempo que vive un recién nacido de la cohorte $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$, entonces $\mathbb{A}_t(\varepsilon)$ es de naturaleza continua.

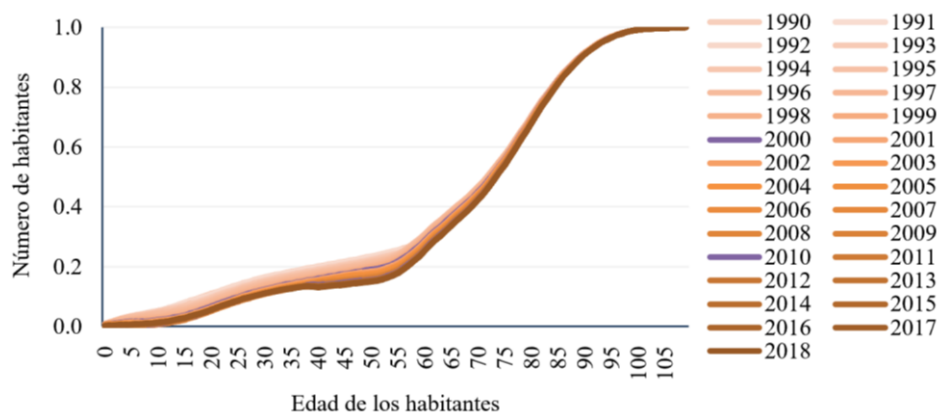
A partir de estas premisas es posible calcular la función de distribución de probabilidades de $\mathbb{A}_t(\varepsilon)$ denotada por $F_{\mathbb{A}_t(\varepsilon)}(\alpha)$, o simplemente $F_{\mathbb{A}_t}(\alpha)$ (Mina-Valdés, A., 2009), conforme lo siguiente:

$$F_{\mathbb{A}_t}(\alpha) = P(\mathbb{A}_t \leq \alpha) = \frac{\Pi_{0_t}(\varepsilon) - \Pi_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)}{\Pi_{0_t}(\varepsilon)} = 1 - \frac{\Pi_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)}{\Pi_{0_t}(\varepsilon)}, \quad \forall \alpha \geq 0 \quad (3.10)$$

Que se interpreta como ‘la probabilidad de que el tiempo de vida de una persona nacida en el año t —de la cohorte dada por $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ —, sea menor o igual a α ’. Al analizar la familia de las funciones de distribución de las defunciones para las cohortes 1990-2018 de la Figura 3.14, se observa la disminución progresiva de la probabilidad de fallecer en el intervalo de edad $[0, 70]$ a lo largo de las

generaciones, en donde, por ejemplo, la probabilidad de fallecer antes de los 50 años ha pasado de 0.23 en 1998 a 0.15 en 2018, lo que implica que alrededor de 68,902 personas que antes fallecían antes de esta edad, en 2018 permanecen con vida, lo que impacta de múltiples maneras si se considera su efecto acumulativo.

Figura 3.102. Funciones de distribución para las cohortes 1990-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Definición 3.52. La *función de supervivencia* de una población $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ es la ecuación que proporciona, para cualquier valor de $\alpha \in [0, \omega - \alpha)$, la probabilidad de que una persona alcance la edad α , la cual se denota por $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$, o simplemente $S_{A_t}(\alpha)$ cuando ε esté bien definido, que se estima mediante la ecuación:

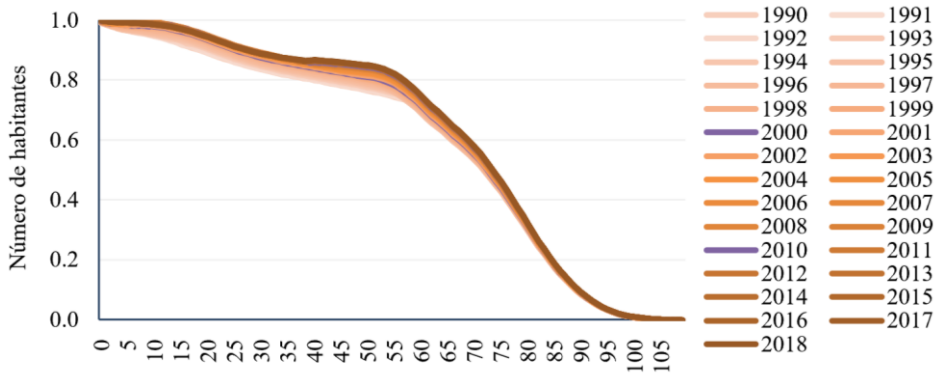
$$S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha) = P(A_t(\varepsilon) > \alpha) = 1 - F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha) = \frac{\Pi_{\alpha_t+\alpha}(\varepsilon)}{\Pi_{0_t}(\varepsilon)}, \forall \alpha \geq 0 \quad (3.11)$$

Esta función se puede interpretar como ‘la probabilidad de que una persona alcance la edad α ’ o bien ‘que fallezca después de alcanzar la edad α ’. Asimismo, es posible enlistar las características de la función $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ a partir de las características que $F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ debe poseer, las tres más relevantes son las siguientes:

- i. Como $F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ es continua $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ es continua,
- ii. como $F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ es no decreciente $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ es no creciente, y
- iii. dado que $F_{A_t(\varepsilon)}(0) = 0$ entonces $S_{A_t(\varepsilon)}(0) = 1$.

En la Figura 3.15 se muestran las funciones de supervivencia de las cohortes 1990-2018, las cuales se van ‘trasladando hacia arriba’ debido a la mejora de las expectativas de supervivencia de la población, un fenómeno incipiente hasta alcanzar los 60 años y cuyos efectos aún se perciben hasta la edad 80, indicando que las probabilidades anuales de sobrevivir han mejorado enormemente en la población mexicana.

Figura 3.103. Funciones de supervivencia para las cohortes 1990-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de estas definiciones es posible hacer declaraciones de naturaleza probabilística sobre la edad de defunción de una persona mediante las funciones $F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ o $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)$ y arreglar esta información en una matriz para su uso sistematizado. Así, por ejemplo, la probabilidad de que una persona fallezca entre las edades α y $\alpha + \tau$ ($\tau > 0$), se estima mediante:

$$\begin{aligned} P(\alpha < A_t(\varepsilon) < \alpha + \tau) &= P[(A_t(\varepsilon) > \alpha) \cap (A_t(\varepsilon) < \alpha + \tau)] \\ &= S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha) - S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha + \tau) \\ &= F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha + \tau) - F_{A_t(\varepsilon)}(\alpha) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Mediante las tablas de supervivencia y muerte es posible desarrollar arreglos matriciales con las probabilidades de transición para las poblaciones y desagregar para todas las causas de defunción y después para una sola causa particular, como los ET en el presente estudio, lo que precisa más definiciones operativas.

Definición 3.53. El número de personas vivas en edad α es una función que depende del número de personas vivas menores a 1 año en el espacio ε y en el año t , caracterizados por la cohorte Π_{0_t} mediante:

$$\pi_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon) = \Pi_{0_t} \cdot S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha) = \Pi_{0_t} \cdot {}_{\alpha}p_{0_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \quad (3.13)$$

Definición 3.54. La probabilidad de que un recién nacido en el espacio ε y en el año t , sobreviva a la edad α , se estima mediante

$${}_{\alpha}p_{0_t}(\varepsilon) = {}_{\alpha}p_{0_t}^{(\tau)}(\varepsilon) = \frac{\pi_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)}{\pi_{0_t}(\varepsilon)} \quad (3.14)$$

Definición 3.55. La probabilidad de que una persona en el espacio ε con edad α en el año t , sobreviva a la edad $(\alpha + n)$, se estima mediante

$${}_n p_{\alpha_t}(\varepsilon) = {}_n p_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) = \frac{\pi_{(\alpha+n)_{t+n}}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \quad (3.15)$$

La ecuación 3.15 también puede estimarse de manera recurrente a través del siguiente planteamiento condicional:

$$\begin{aligned} {}_n p_{\alpha_t}(\varepsilon) &= P[A_t(\varepsilon) > \alpha + n | A_t(\varepsilon) > \alpha] = \frac{P[(A_t(\varepsilon) > \alpha + n) \cap (A_t(\varepsilon) > \alpha)]}{P(A_t(\varepsilon) > \alpha)} \\ &= \frac{S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha + n)}{S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha)} = {}_n p_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Por lo que también se cumple $S_{A_t(\varepsilon)}(\alpha + n) = {}_{\alpha+n} p_{0_t}(\varepsilon)$.

Definición 3.56. La probabilidad de que un recién nacido, ubicado en el espacio ε y el tiempo t , fallezca por cualquier causa en algún momento durante los siguientes n años, se denota por

$${}_n q_{0_t}(\varepsilon) = {}_n q_{0_t}^{(\tau)}(\varepsilon) = \frac{{}_n d_{0_t}(\varepsilon)}{\pi_{0_t}(\varepsilon)} = \frac{{}_n d_{0_t}(\varepsilon)}{\pi_{0_t}(\varepsilon)} = \frac{\pi_{0_t}(\varepsilon) - \pi_{n_t+n}(\varepsilon)}{\pi_{0_t}(\varepsilon)} = 1 - {}_n p_{0_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \quad (3.17)$$

Definición 3.57 La probabilidad de que un recién nacido en el espacio ε y en el año t , fallezca por cualquier causa en algún momento durante los primeros n años, se denota por

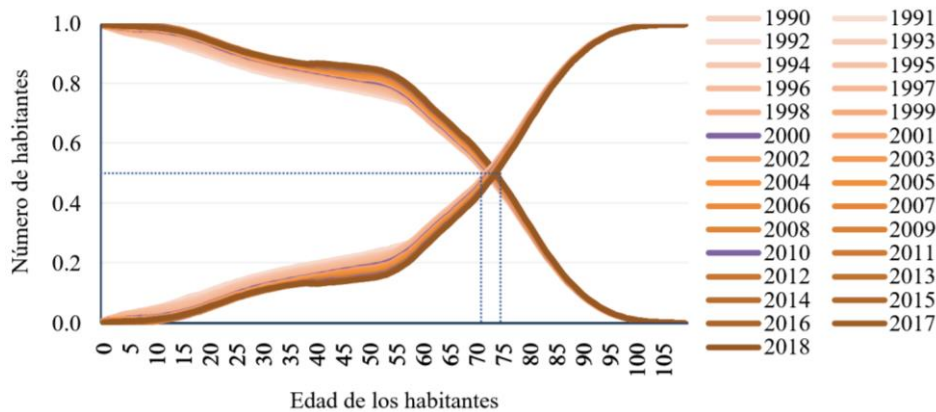
$${}_n q_{\alpha_t}(\varepsilon) = {}_n q_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) = \frac{{}_n d_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} = \frac{{}_n d_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} = \frac{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon) - \pi_{n_t+n}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} = 1 - {}_n p_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \quad (3.18)$$

Por tanto,

$${}_n q_{\alpha_t}(\varepsilon) = 1 - {}_n p_{\alpha_t}(\varepsilon) = {}_n q_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) = 1 - {}_n p_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \quad (3.19)$$

En la Figura 3.16 se muestran las funciones de distribución y supervivencia para las cohortes 1990-2018, las cuales se cruzan en distintas edades dependiendo del año de inicio de la cohorte, lo que permite estimar la ganancia que experimenta la sociedad mexicana en el tiempo de vida. Por ejemplo, al comparar las cohortes 1990 y 2018 se observa que el punto de encuentro de las funciones varía en aproximadamente 5 años, de la edad 73 a la 78, esto se puede interpretar como la ganancia de tiempo de vida de la población en este periodo.

Figura 3.104. Funciones de distribución y supervivencia poblacional para las cohortes 1990-2018

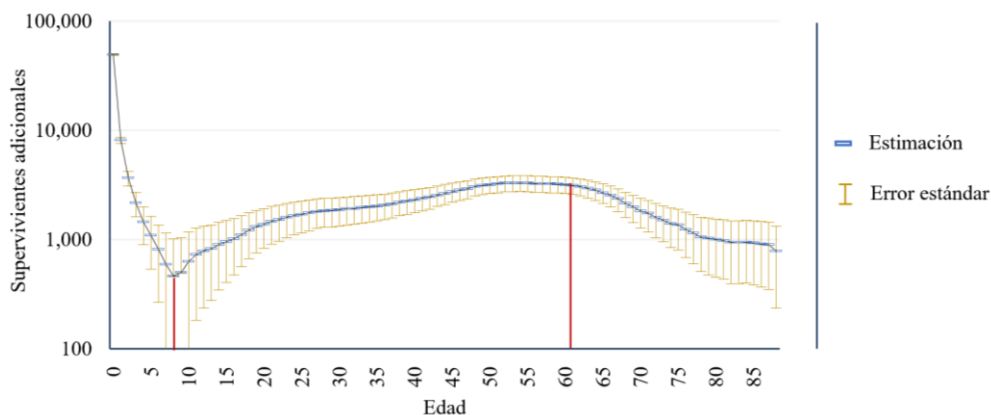


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de CONAPO (2018) e INEGI (2020).

Ahora bien, en política pública es por demás útil estimar cuántas personas adicionales sobrevivieron a cierta edad al mantener las condiciones de una situación previa a la intervención, en el caso de los ET estas condiciones refieren a la hipótesis de mortalidad de un año particular, para lo cual es necesario conocer la distribución de las probabilidades en ambos años para cada edad y después estimar las defunciones que hubiesen ocurrido de no haberse modificado dichas probabilidades.

Por ejemplo, en 1990 se registraron 78,995 defunciones de menores de 1 año, lo que representa 3.4% del total que estaban vivas en ese año; no obstante, en 2018 ese porcentaje fue 1.1%, lo que referido a los 2,209,871 menores de 1 año registrados como vivos a mitad del año, supondría 74,276 defunciones —4,719 menos que en 1990 debido a una menor población en esa edad—, como en realidad solo se registraron 24,772 defunciones en este grupo etario, se asume que hubo 49,504 menos fallecimientos debido a una menor tasa de mortalidad, lo que representa una disminución real de 66.6% en ese año.

Figura 3.105. Número de sobrevivientes adicionales por edad al contrastar tasa de 2018 versus 1990



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 3.17 se puede observar los resultados de este procedimiento al comparar las ocurrencias en 2018 respecto de 1990 para todas las edades, como puede observarse, los menores de un año muestran el mayor número de sobrevivientes adicionales. Desde luego, las muertes no ocurridas a cierta edad se compensan en alguna otra edad, típicamente en una edad posterior, aunque no siempre es el caso, sí es lo más frecuente.

Como todas las personas que sobreviven a cierto año necesariamente fallecen en el transcurso de los siguientes, en realidad el concepto más relevante es el tiempo de vida futuro y no el número de ‘vidas salvadas’ propiamente. Este punto es particularmente importante en la ocurrencia de los ET, ya que

muchos de los involucrados en este tipo de eventos que no fallecen a causa del evento, pero como existe una proporción significativa de ellas que sufrieron heridas, estas personas permanecen con secuelas permanentes que no solo merman su calidad de vida, sino que modifican sus probabilidades de supervivencia, un asunto que también impacta enormemente a los sistemas de salud, productivos y financieros.

En este sentido, el sistema de registro considera ‘defunción por ET’ a toda persona que, como consecuencia de un ET, fallezca en el acto o dentro de los siguientes treinta días, desde luego, se excluyen los casos confirmados de muertes naturales y los relacionados con el suicidio o aquellas fallecidas después de 30 días. Además, se considera herido con hospitalización superior a veinticuatro horas a toda persona que, como consecuencia de un ET, haya requerido atención médica.

Definición 3.58. Al número de personas involucradas en un ET en el espacio ε y en el tiempo t , se denota por $\mathbb{I}_t(\varepsilon)$, una VA que a su vez se descompone como la suma de dos variables aleatorias complementarias: número de personas que permanecieron vivas después del ET, denotado por $\mathcal{V}_t(\varepsilon)$ y número de defunciones $\mathcal{D}_t(\varepsilon)$, por lo que al materializarse un ET, siempre se cumple lo siguiente:

$$\mathbb{I}_t(\varepsilon) = \mathcal{V}_t(\varepsilon) + \mathcal{D}_t(\varepsilon) \quad (3.20)$$

cuya esperanza matemática $E[\mathbb{I}_t(\varepsilon)] = \mathbb{i}_t(\varepsilon)$, está dada por

$$E[\mathbb{I}_t(\varepsilon)] = \mathbb{i}_t(\varepsilon) = E[\mathcal{V}_t(\varepsilon) + \mathcal{D}_t(\varepsilon)] = E[\mathcal{V}_t(\varepsilon)] + E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)] = v_t(\varepsilon) + d_t(\varepsilon) \quad (3.21)$$

En la Figura 3.18 se observa la evolución del número de heridos y muertos a nivel nacional con sus respectivos valores promedio.

Figura 3.106. Evolución del número de *Heridos y Defunciones*, 1998-2018



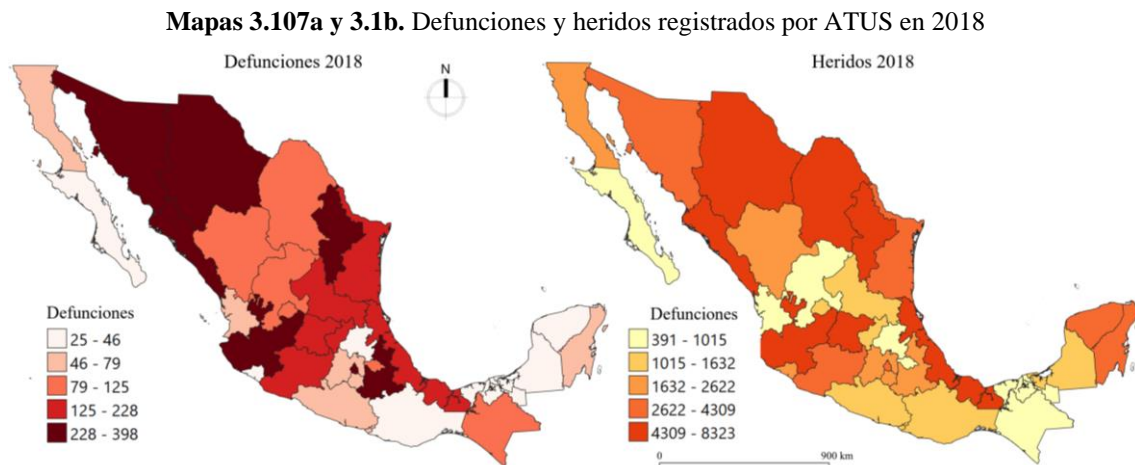
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, las series no parecen estar cointegradas, no obstante, poseen un grado significativo de correlación ($R=0.64$, $p<0.001$) que puede ayudar a realizar pronósticos en algunos periodos de tiempo y a evaluar la severidad en distintos espacios territoriales.

Dado que el número $\mathcal{V}_t(\varepsilon)$ es una VA que puede a su vez descomponerse en dos VA: *No heridos* y *Heridos*, tal que $\mathcal{V}_t(\varepsilon) = \mathcal{U}_t(\varepsilon) + \mathcal{H}_t(\varepsilon)$, es posible descomponer al número de vivos en la ecuación general:

$$E[\mathbb{I}_t(\varepsilon)] = \mathbb{i}_t(\varepsilon) = E[\mathcal{U}_t(\varepsilon) + \mathcal{H}_t(\varepsilon) + \mathcal{D}_t(\varepsilon)] = u_t(\varepsilon) + h_t(\varepsilon) + d_t(\varepsilon) \quad (3.22)$$

En los Mapas 3.1a y 3.1b se observa que en el año 2018 las cifras absolutas de heridos predominan en el Estado de México (1,329), Jalisco (1,285), Guanajuato (1,060), Puebla (824) y Nuevo León (692), mientras que las entidades con mayor número de defunciones por ATUS son Jalisco (398), Sinaloa (302), Chihuahua (294), Nuevo León (249) y Ciudad de México (240).



Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

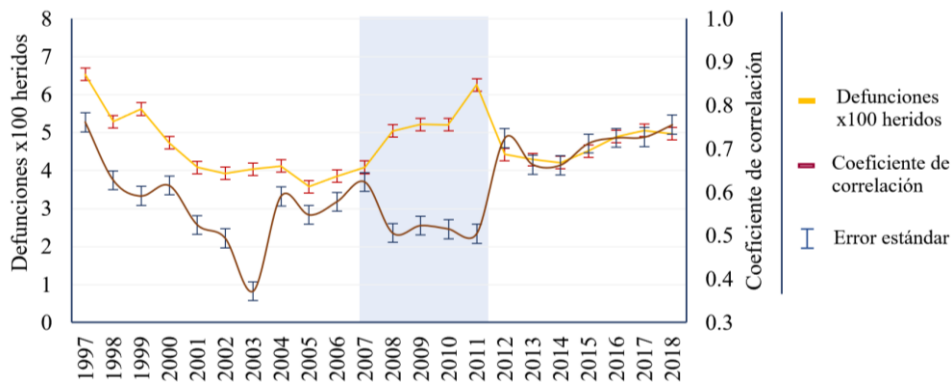
Una cuestión de particular interés para el sector salud y las compañías aseguradoras es la relación entre heridos y defunciones por ET debido, sobre todo, a la previsión y gestión de fondos para afrontar sus consecuencias financieras.

Otro aspecto recurrente en la investigación de los mercados aseguradores consiste en analizar si es posible deducir la relación entre heridos y defunciones como una regla general, ya que es frecuente suponer que un aumento en la intensidad de las defunciones se verá reflejado necesariamente en un aumento en la severidad de los ET, sin embargo, las evidencias parecen indicar que no siempre es el caso y que depende de muchas otras variables. Además, como ya se ha señalado anteriormente, a pesar de los avances en los sistemas de registro, la calidad de los datos aún juega un rol fundamental para realizar inferencias generalizables.

Asimismo, es necesario recordar que en la ecuación 2.49 se mostró que la incidencia $\mathcal{I}_t(\varepsilon; Fatales)$ podía estimarse mediante el cociente de las variables aleatorias $\mathcal{N}_t(\varepsilon; Fatales)$ y $\Pi_t(\varepsilon)$. Como fenómeno propulsor de la mortalidad, la incidencia juega un rol central en los ET siempre que se registre adecuadamente, en este sentido, México experimenta diversos desafíos en la calidad de su información ya que son las entidades federativas las que reportan los datos y no siempre conservan los mismos estándares ni protocolos de consolidación, provocando que algunas veces se planteen dudas razonables sobre los alcances de las fallas en los procedimientos de consolidación y el impacto de las inconsistencias halladas, sobre todo si estas son intencionales o sistemáticas.

Usualmente, el ratio defunciones-heridos se asemeja a los índices de letalidad, sin embargo, en México cada entidad federativa exhibe estructuras y coeficientes específicos que, a menudo, no son concurrentes. En la Figura 3.19 se observa en la línea color naranja el ratio de defunciones por cada 100 heridos a nivel nacional, por su parte, la línea bermellón refiere al coeficiente de correlación entre el número de heridos y defunciones registrados a nivel estatal en cada año.

Figura 3.108. Evolución del cociente y la correlación entre *Defunciones y Heridos*, 1998-2018



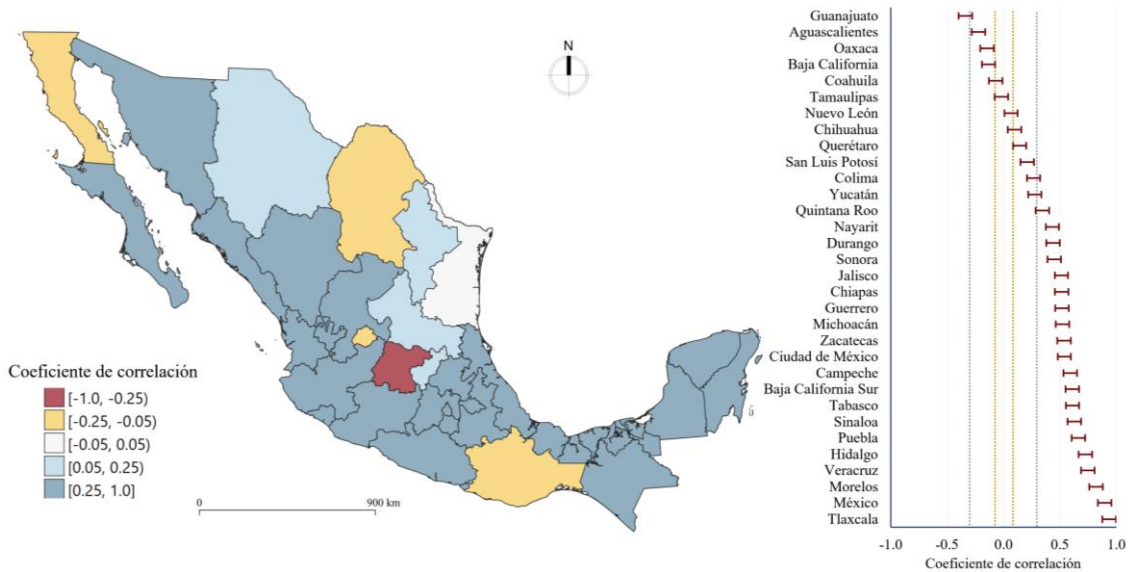
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede corroborarse en la gráfica, el coeficiente de correlación varía a lo largo del tiempo, aunque a partir de 2012 se mantiene por encima de 0.7 entre ambas series, promediando un valor de $R=0.640$ ($p<0.001$) a nivel nacional.

En el mismo gráfico resulta de interés cómo ambos indicadores decrecen en un periodo de tiempo, lo que podría estar asociado a la progresión de los dispositivos de seguridad que ayudan aminorar las defunciones y que, como consecuencia, resultan en personas heridas, lo que disminuye la intensidad de la correlación entre ambas magnitudes y coincide con el alza del ratio nacional, lo que no se refleja en el coeficiente de correlación.

En el Mapa 3.2 se muestra en color graduado el coeficiente de correlación entre las variaciones del número de heridos y de defunciones para ATUS, exhibiendo cómo no todas las entidades siguen el flujo de aumento de la dinámica nacional, lo que sugiere investigar situaciones particulares en algunos estados con el fin de conocer si esta falta de concurrencia representa al comportamiento del fenómeno y no se debe a problemas de subregistro.

Mapa 3.109. Correlación entre número de defunciones y heridos registrados por ATUS, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con el fin de poner en indicadores la relación entre involucrados y heridos, se cuenta con las siguientes definiciones.

Definición 3.59. La *oportunidad relativa de involucrados heridos respecto a las defunciones por ET*, dentro del espacio ε y tiempo t , se define como:

$$OR_t(\varepsilon; \text{Heridos}, \text{Defunciones}) = \frac{h_t(\varepsilon)/d_t(\varepsilon)}{1 - h_t(\varepsilon)/d_t(\varepsilon)} = \frac{h_t(\varepsilon)}{d_t(\varepsilon) - h_t(\varepsilon)} \quad (3.23)$$

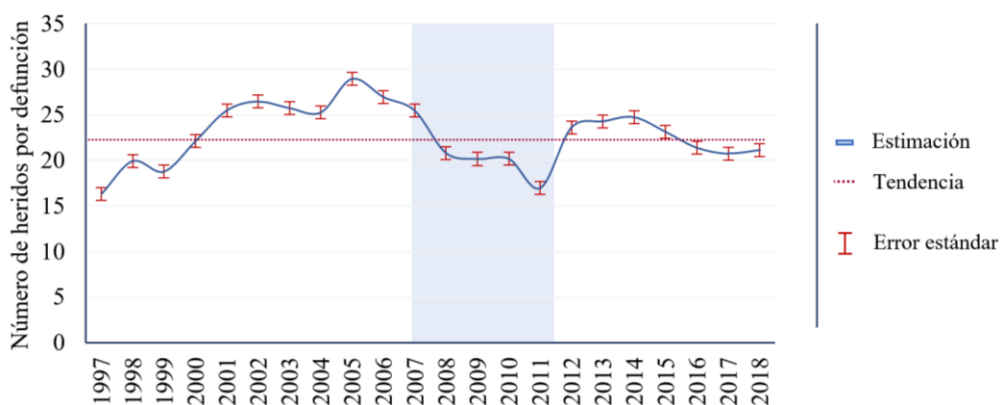
La oportunidad relativa permite estimar las probabilidades de que un ET derive en heridos y no en defunciones, lo que se vuelve especialmente útil al dimensionar las cifras ocultas de los heridos no registrados mediante la transformación inversa.

Esta forma de proceder con las estimaciones es por demás útil ante diversos casos de subregistro y también para estimar proporciones en conjuntos de datos en donde no se miden las variables de manera explícita. Al igual que sucede con otras variables, en México solo se cuenta con estos datos para las

zonas urbanas y suburbanas, sin embargo, al concentrar gran parte de los eventos, permite realizar algunas estimaciones a escala.

Por ejemplo, un valor pequeño de la $OR_t(ATUS; Heridos, Defunciones)$ indica una baja proporción de heridos respecto a las defunciones, si a una colección de OR_t indexada con el tiempo se le asocia una pendiente negativa, se obtiene una evidencia de que disminuye la cantidad de *ET-No fatales* respecto a los *ET-Fatal*, es decir, que los ET observados son más letales. En la Figura 3.20 se muestra la evolución de este índice construido con ATUS durante el periodo 1997-2018, en ella se puede observar cómo la OR crece en los primeros 10 años —promediando más heridos por cada muerto— y luego decrece en el periodo 2007-2011 en el cual aumentaron las defunciones de manera inusual —con una OR inferior en 40% que coloca en 16 heridos por defunción—, para posteriormente volver a oscilar alrededor del su tendencia de 23 heridos por cada fallecimiento.

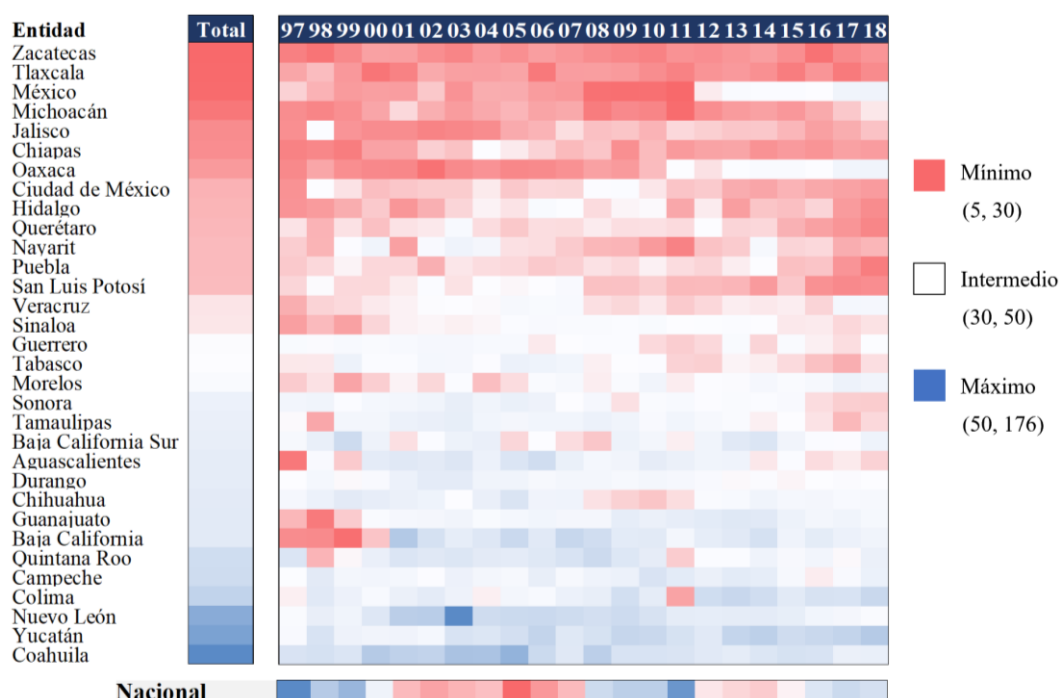
Figura 3.110. Evolución del número de heridos por cada defunción, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En seguimiento a lo anterior, como se ha mencionado, los registros de las entidades poseen sus propios parámetros y su evolución también exhibe distintas trayectorias. En la Figura 3.21 se muestra en color graduado la evolución del número de heridos por cada defunción para todas las entidades. La lista de letalidad está ordenada de menor a mayor en la relación de heridos-fatalidades y es encabezada por Zacatecas y Tlaxcala con 9 heridos por muerto, seguido del Estado de México (10), Michoacán (11) y Jalisco (13); por lo contrario, Nuevo León, Yucatán y Coahuila muestran la mayor cantidad de heridos por defunción, con 51, 55 y 62, respectivamente.

Figura 3.111. Evolución del número de *heridos por cada defunción* a nivel estatal, 1998-2018

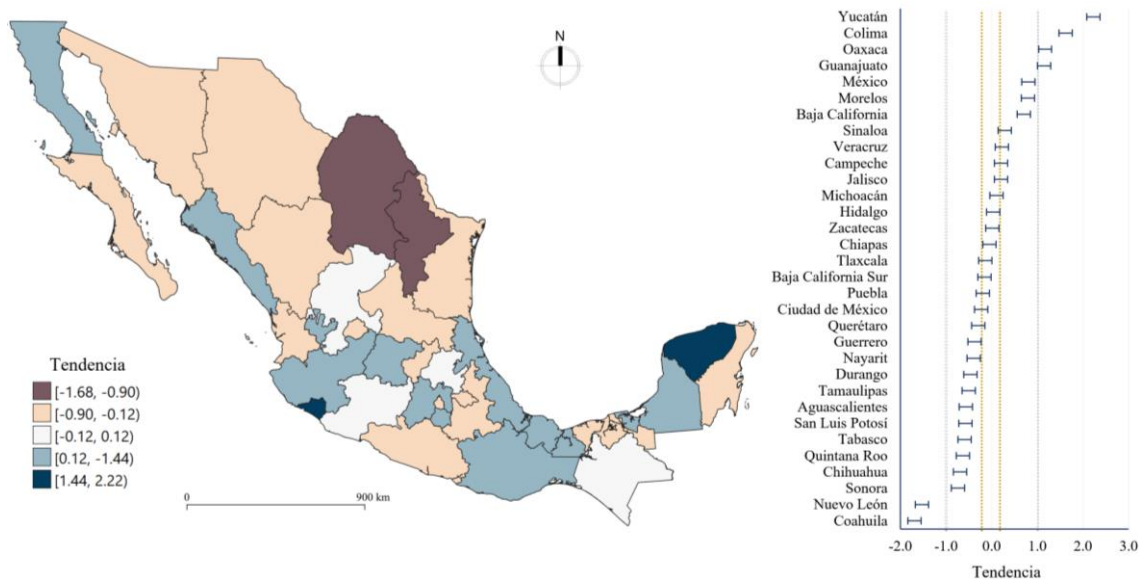


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otro aspecto relevante en este ratio refiere a la tendencia evolutiva de cada entidad federativa. Diversos estados han logrado mejorar su situación a lo largo del tiempo mientras que otros que presentaban OR más altas en el pasado, han empeorado su situación. El Mapa 3.3 muestra la pendiente de la tendencia del indicador para cada entidad, un parámetro que se asocia con la dirección de la evolución del indicador. A nivel nacional, el coeficiente de la tendencia es -0.002, que no es estadísticamente distinto de cero, lo que indica que la serie ha permanecido estable y que, por tanto, las variaciones son provocadas por fluctuaciones que no son suficientes para cambiar al fenómeno de nivel.

A pesar del resultado nacional, los registros estatales indican historias distintas en cada caso. Por ejemplo, Nuevo León y Coahuila presentan la mayor OR y, por tanto, la menor relación de letalidad, no obstante, su tendencia negativa de -1.69 y -1.53, respectivamente, implica que en el largo plazo su situación se ha ido volviendo menos positiva y todavía empeorará en el futuro. Por lo contrario, Zacatecas, que exhibe la relación más baja y letal con un promedio de 9 heridos por muerto en ET, posee un coeficiente de 0.01 —de igual manera que Chiapas (-0.05), Hidalgo (0.03) y Michoacán (0.10)— lo que sugiere que no habrá cambios en su nivel de letalidad en los próximos años; en cambio. Asimismo, la tendencia positiva de Oaxaca (1.17) y el Estado de México (0.80) sugieren una disminución importante en los últimos años y su potencial de reducción en el mediano plazo.

Mapa 3.112. Evolución del número de *heridos por cada defunción* a nivel estatal, 1998-2018



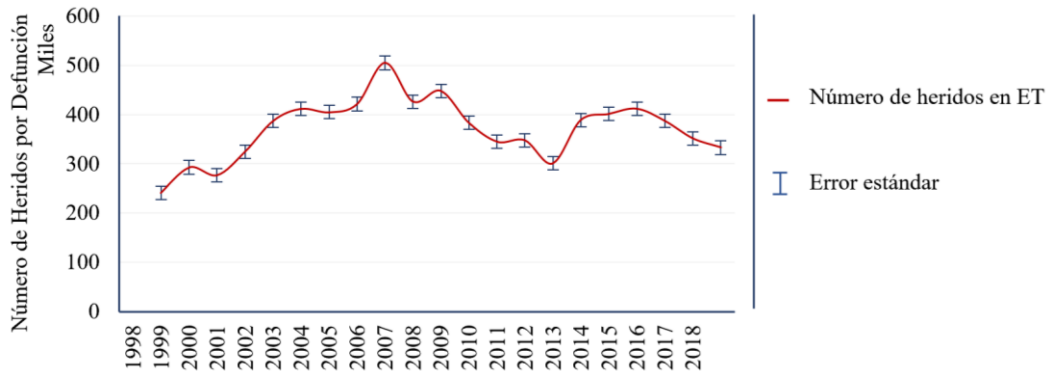
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Por otro lado, la distribución de las mediciones estatales de OR muestra que la media de heridos por defunciones es de 27 y que la mitad de las mediciones estatales se ubican por debajo de 22, lo que, sumado a una desviación estándar de 18, nos permite realizar estimaciones sobre su impacto en diversas esferas de la gestión pública.

Como valor de referencia, el ratio de heridos por defunción no son nada alentadores ya que, de acuerdo con la OMS (2019), cada año fallecen 1,3 millones de personas y entre 20 y 50 millones padecen traumatismos no mortales por ET, lo que establece un rango entre 15 y 38 heridos por cada fallecimiento a nivel mundial. En México, la media en el periodo 1998-2018 oscila alrededor de 22, aunque algunos años se ha descendido hasta 17 (2011), lo que coincide con los niveles más altos de mortalidad y letalidad observados en las últimas décadas.

Una de las mayores ventajas de poder llevar a cabo los cálculos sugeridos por las ecuaciones 3.21 y 3.22 es la posibilidad de estimar el número de heridos por ET a nivel nacional, a partir de los datos de ATUS y sin consultar la base de datos de los egresos hospitalarios. En la Figura 3.22 se muestra el resultado de este ejercicio para el periodo de estudio, todos los valores obtenidos se encuentran dentro de las bandas marcadas por las estimaciones de la OMS, lo que aumenta el nivel de confianza en las estimaciones como una aproximación al fenómeno de manera inferencial.

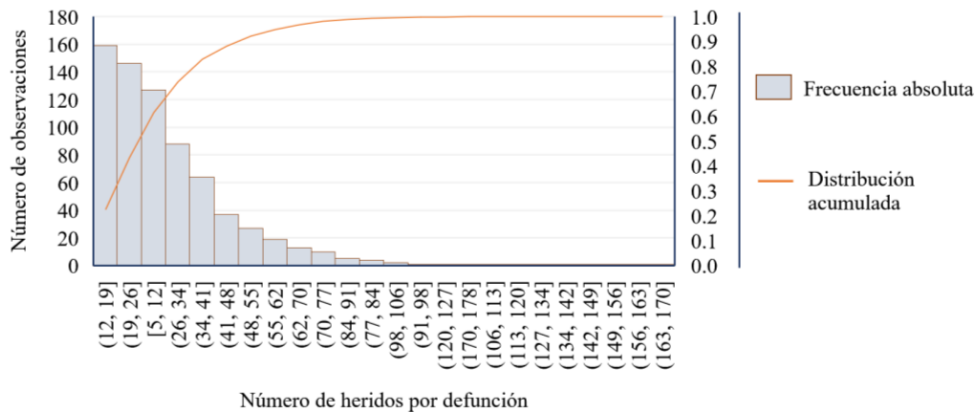
Figura 3.113. Evolución del número de heridas por cada defunción, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse en la línea roja, los errores de estimación permiten observar las variaciones a lo largo del tiempo y cómo el número de heridos por ET se ubica alrededor de las 370,000 personas. Desde luego, esta cifra representa a aquellos que pudieron ser relevantes como para ser registrados en los *ET-No fatales* y no en los de la clase *ET-Solo daños*. Estas estimaciones permiten aproximar las demandas potenciales del sector salud y proyectar su evolución más probable con el fin de dedicar recursos y gestionar de mejor manera las necesidades del sistema para atender los heridos en el futuro.

Figura 3.114. Histograma del número de heridas por cada defunción, nivel estatal, 1998-2018

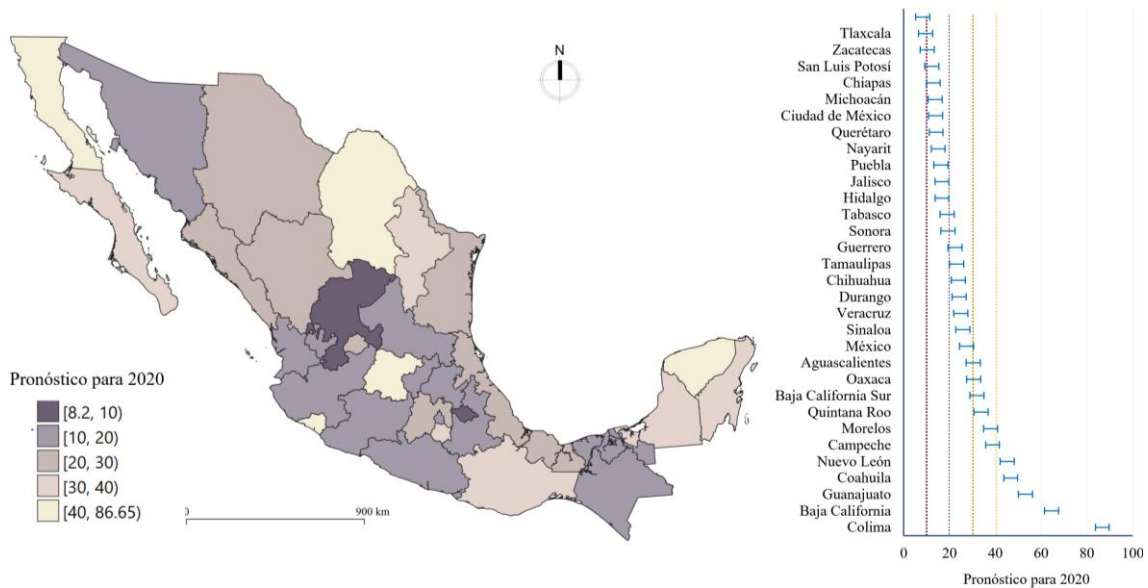


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para observar las condiciones en que se encuentra cada entidad federativa, la Figura 3.23 muestra el histograma del número de heridas por cada defunción a nivel estatal durante 1998-2018. Como puede verse, el 20% de las estimaciones estatales superan los 38 heridos por defunción y apenas 5% es mayor a 51 heridos por muerte, lo que en algunas naciones se ha propuesto como el umbral mínimo de la gestión de este tipo de riesgos.

Con base en las estimaciones anteriores, es posible realizar algunos pronósticos para las entidades federativas. Como puede verse en el Mapa 3.4, Yucatán (87), Colima (64), Baja California (53), Guanajuato (47) y Coahuila (45) son las entidades con la mayor OR prevista; mientras que se espera que San Luis Potosí (10), Zacatecas (9) y Tlaxcala (8) muestren la menor cantidad de heridos por cada defunción, obteniendo estos dos últimos estados 10 veces más muertos por herido que Yucatán en 2020.

Mapa 3.115. Pronóstico del número de *heridos por cada defunción* a nivel estatal en 2020



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

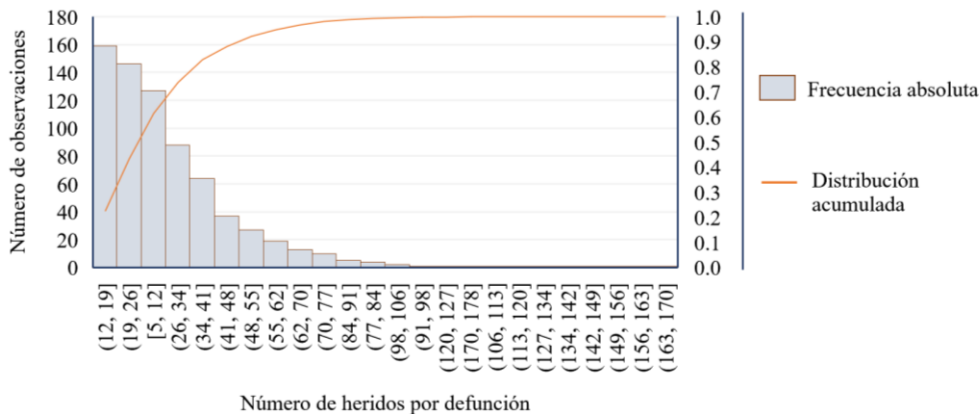
Estas estimaciones permiten generar modelos específicos para cada delimitación territorial con el fin de generar estrategias ad hoc que permitan concentrar los esfuerzos en donde más se requieren. Como puede verse en la Figura 3.24, la distribución de las observaciones es dominante en las frecuencias menores y decae exponencialmente, lo que vuelve poco probable las grandes concentraciones de defunciones en las entidades.

Desafortunadamente, como se ha visto también con el número de ET, en el sistema nacional no se registran todos los involucrados en un ET y, hasta el momento, las mediciones de $\mathbb{I}_t(\varepsilon)$ parecen estar subestimadas.

No obstante, debido a su interacción con otras variables y a que, teóricamente, sí se registran los datos para modelarla, existen diversas posibilidades para realizar estimaciones sobre ella, por lo que es necesario insistir con las autoridades en la mejora del registro y mantener las debidas precauciones para su comparabilidad, teniendo en estos momentos un uso teórico más dominante, debido a que la

notación desarrollada también permite realizar estimaciones sobre el riesgo de las personas en edad α y considerar distintos grupos de personas vulnerables.

Figura 3.116. Histograma del número de defunciones por millón de habitantes a nivel estatal 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

3.2 Intensidad del riesgo

En el estudio de modelos a través del tiempo, siempre es relevante la forma dinámica del fenómeno, especialmente cuando el análisis se centra en las variaciones a lo largo del tiempo. Desde luego, la obtención de funciones analíticas simplifica y vuelve más eficientes los cálculos, además, la variación paramétrica del modelo también permite estudiar sus propiedades cualitativas. Cualquiera que sea el interés, para analizar los cambios en la dinámica y los niveles de impacto de las defunciones por ET que experimenta una población respecto a sus probabilidades totales de fallecer, es necesario descomponer el riesgo en al menos dos procesos que permitan medir su magnitud mediante funciones compuestas: la *frecuencia* y la *severidad*.

Para continuar desarrollando el modelo y con base en las definiciones anteriores, se propone una medida para estimar el riesgo de que un individuo de una población dada $\Pi_t(\varepsilon)$, localizada en el espacio ε en el tiempo t , pierda la vida debido a un ET. Este planteamiento se puede modelar como un sistema de probabilidades condicionadas que se van ‘encadenando en el tiempo’, considerando que primero es necesario que el sujeto se vea involucrado en un ET y, una vez detonado este suceso, ocurra su fallecimiento.

Con base en este planteamiento, considere una colección $ET_1(\varepsilon, t), \dots, ET_k(\varepsilon, t), \dots, ET_{\mathcal{N}_t(\varepsilon)}(\varepsilon, t)$ finita que puede escribirse como $\{ET_i(\varepsilon, t)\}$ con $i = \overline{1, \dots, \mathcal{N}_t(\varepsilon)}$, en la que cada $ET_j(\varepsilon, t)$ provoca, en

el mismo espacio ε , un número finito de defunciones $\mathcal{D}_t^{(ET_i)}(\varepsilon) \in [0, n]$ que cumplen las siguientes dos condiciones:

1. El número de ET, $\mathcal{D}_t^{(ET_k)}(\varepsilon)$ dadas por $ET_k(\varepsilon, t)$ es independiente de k .
2. El número de defunciones ocurridas $ET_i(\varepsilon, \tau)$ es independiente de las ocurridas en $ET_j(\varepsilon) \forall i, j$ y $\tau \in [t, s]$

Entonces, por la Ley de la probabilidad total, para el j -ésimo ET, se puede estimar la probabilidad $P[ET_j(\varepsilon, t) = 'Fatal']$ se puede desagregar de la siguiente manera:

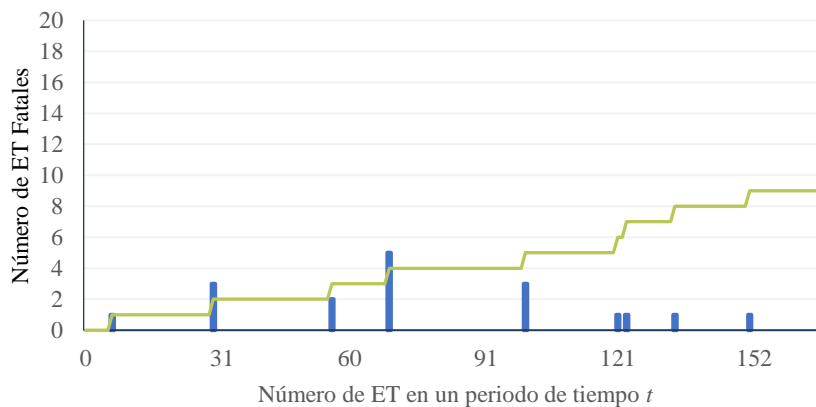
$$P[ET_j(\varepsilon, t) = 'Fatal' | ET_j(\varepsilon, t) = 1] \cdot P[ET_j(\varepsilon, t) = 1] + P[ET_j(\varepsilon, t) = 'Fatal' | ET_j(\varepsilon, t) = 0] \cdot P[ET_j(\varepsilon, t) = 0]$$

Y dado que el segundo término es un suceso imposible, entonces

$$P[ET_j(\varepsilon, t) = 'Fatal'] = P[ET_j(\varepsilon, t) = 'Fatal' | ET_j(\varepsilon, t) = 1] \cdot P[ET_j(\varepsilon, t) = 1] \quad (3.24)$$

El resultado anterior indica que los resultados observables dados por los registros se ven mediante una secuencia escalonada de ET, como la mostrada en la Figura 3.25, que sucede a diferentes intervalos de tiempo y que al final de cierto periodo, típicamente un año, acumulan el número registrado para ese mismo año.

Figura 3.117. Serie de tiempo con el número de ET y el número de fallecimientos producidos



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De este modo, el proceso mediante el cual se gestan as defunciones por ET a lo largo de un periodo, es un mecanismo dinámico que posee propiedades estadísticas que pueden ser modeladas como un proceso de variación poblacional, lo que a continuación se precisa.

Definición 3.60. El proceso *poblacional de defunciones por ET* se genera mediante la composición de los procesos estocásticos de frecuencia de ET y ocurrencia de defunciones generados por la familia $\{ET_i(\varepsilon, t)\}$ con $i = \overline{1, \dots, \mathcal{N}_t(\varepsilon)}$, lo que se expresa mediante la suma aleatoria de la severidad de cada ET motivado por las discordancias de tránsito

$$\mathcal{D}_t^{(ET_1)}(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_t^{(ET_k)}(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_t^{(ET_{\mathcal{N}_t(\varepsilon)})}(\varepsilon) \quad (3.25)$$

Tal que se satisface la igualdad de la ecuación 3.26

$$\mathcal{D}_t(\varepsilon) = \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_t(\varepsilon)} \mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \quad (3.26)$$

Como puede observarse, el lado derecho es una suma aleatoria de variables aleatorias, ambas parametrizadas con el tiempo, lo que lo convierte en una suma estocástica. El número total de defunciones dadas en un periodo $\tau \in [t, s]$, están dadas por el proceso

$$\sum_{i=1}^{\mathcal{N}_t(\varepsilon)} \mathcal{D}_t^{(ET_i)}(\varepsilon) = \mathcal{D}_t(\varepsilon)$$

que es independiente del proceso de conteo $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$, por lo que al tomar las esperanzas matemáticas, se tiene

$$\begin{aligned} E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)] &= d_t(\varepsilon) = E \left[\sum_{j=1}^{\mathcal{N}_t(\varepsilon)} \mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \right] \\ &= \sum_{n_t=0}^{\infty} E \left[\sum_{j=1}^{E[\mathcal{N}_t]} \mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \mid \mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t \right] P[\mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t] \\ &= \sum_{n_t=0}^{\infty} E \left[\sum_{j=1}^{n_t} \mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \mid \mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t \right] P[\mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t] \\ &= \sum_{n_t=0}^{\infty} n_t \cdot E \left[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \right] \cdot P[\mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t] \\ &= \sum_{n_t=0}^{\infty} n_t \cdot P[\mathcal{N}_t(\varepsilon) = n_t] \cdot E \left[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Dado que todos los elementos $ET_i(\varepsilon, t)$ de la familia $\{ET_i(\varepsilon, t)\}$ son VA independientes e idénticamente distribuidas (*iid*) sobre ε y t , entonces $E \left[\mathcal{D}_t^{(ET_i)}(\varepsilon) \right] = E \left[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon) \right] = d_t^{(ET)}(\varepsilon)$, por lo que

$$d_t(\varepsilon) = E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)] \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon) = n_t(\varepsilon) \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon) \quad (3.28)$$

Que representa el número de defunciones esperadas por ET para toda la población en ε y t , para lo cual se satisface la ecuación

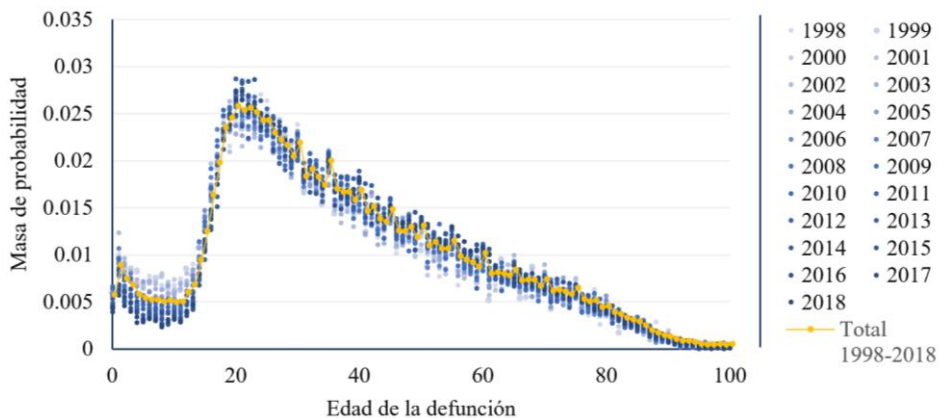
$$\frac{d_t(\varepsilon)}{n_t(\varepsilon)} = d_t^{(ET)}(\varepsilon) = \lambda_t(\varepsilon)$$

Por lo que

$$d_t(\varepsilon) = n_t(\varepsilon) \cdot \lambda_t(\varepsilon) \quad (3.29)$$

En la Figura 3.26 se observa la distribución de las frecuencias relativas de las defunciones por edad para los años 1998-2018, lo que coincide con la estimación de la probabilidad bruta de cada caso. El color graduado refiere a los años, los tonos claros remiten a los primeros años y los puntos se oscurecen conforme pasa el tiempo. Como puede observarse, las masas de probabilidad de las defunciones para cada edad se encuentran dentro de ‘bandas’ que permiten reconocer la estructura de la distribución ‘más allá del año de que se trate’, lo que provee de elementos de análisis muy generosos que pueden ser invariantes ante la escala, por ejemplo, al realizar agrupaciones —por edad, sexo o cualquier otro atributo de vulnerabilidad, o por periodos de tiempo o conjuntos territoriales específicos— o bien, desagregaciones admisibles en las escalas de registro, lo que explica que su forma sea muy similar a la mostrada en la Figura 3.26, lo que también permite modelarla analíticamente, como se hace más adelante.

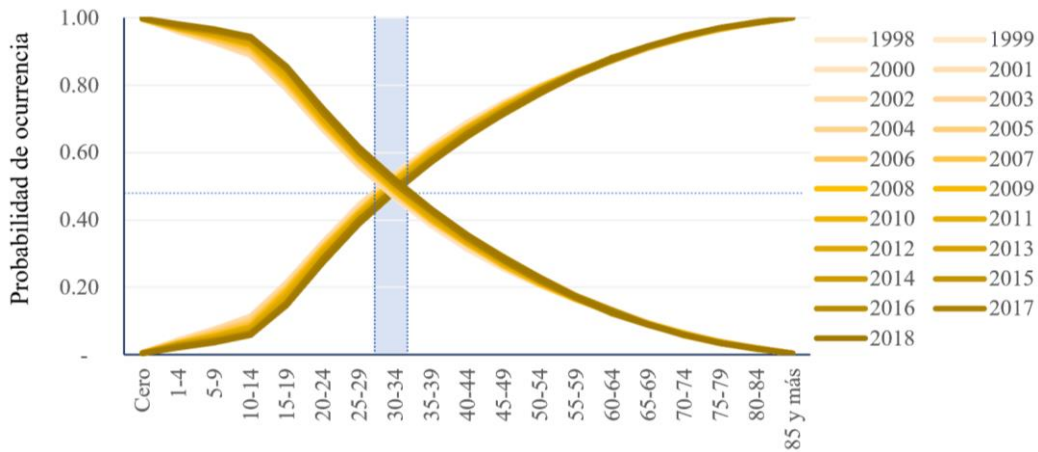
Figura 3.118. Masas de probabilidad de las defunciones por edad, series 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 3.27 se muestran las funciones de supervivencia y distribución, que indican las probabilidades acumulada de defunción a cierta edad y su complemento. El color graduado refiere a los años de las cohortes en donde las más claras son las más alejadas, comenzando en 1990 su posterior evolución hasta llegar a 2018. Como puede observarse, las curvas son muy similares entre los años, no obstante, se observa una disminución gradual en las probabilidades de fallecer, sobre todo en el intervalo 0-14, lo que después se vuelve monótono hasta converger en distribución a alrededor de la edad 60.

Figura 3.119. Funciones de distribución y supervivencia a los ET, cohortes 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otro aspecto que destaca en la gráfica de probabilidades es la familia de puntos en donde coinciden las funciones de distribución y supervivencia: las correspondientes a las cohortes de los años 90 —las curvas amarillo más claras— cruzan en el quinquenio 25-29 y antes de llegar a los 30 años, mientras que las color café cruzan hasta el final del quinquenio 30-34, lo que supone una ganancia aproximada de 5 años para acumular la misma probabilidad de fallecer por un ET en una edad sumamente productiva, lo que también se traduce en un menor impacto social.

Para profundizar en el análisis de la intensidad de las defunciones, es necesario estudiar la dinámica e intensidad de la mortalidad que opera sobre la población, comenzando por las estimaciones de las tasas en un espacio y periodo de tiempo específico.

De acuerdo con la OMS (2020), los datos de mortalidad indican ‘el número de defunciones por lugar, intervalo de tiempo y causa’ y deben reflejar las defunciones recogidas en los sistemas nacionales de registro civil, con las *causas básicas de defunción* codificadas por las autoridades nacionales. De acuerdo con la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE), la causa básica de defunción se define como ‘la enfermedad o lesión que desencadenó la sucesión de eventos patológicos que condujeron directamente a la muerte, o las circunstancias del accidente o acto de violencia que produjeron la lesión mortal’ (2020). Lo que se atiende mediante la siguiente definición.

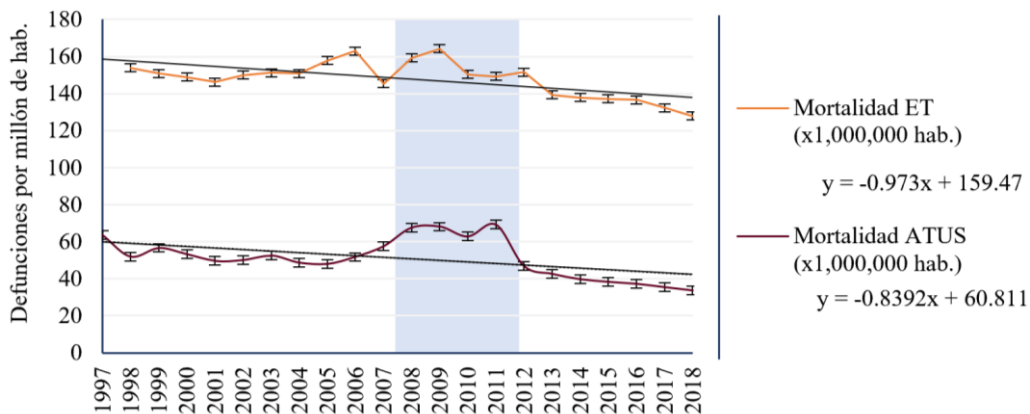
Definición 3.61. La *tasa de mortalidad de las DT* sobre el espacio ε y el tiempo t , denotada por $m_t(\varepsilon)$, es la *intensidad de las defunciones por ET*, generada por el proceso de riesgo operando en una población definida sobre el espacio ε y el tiempo t , cuya estimación distribuye el riesgo $\mathcal{R}_t(\varepsilon)$ que origina las $\mathcal{D}_t(\varepsilon)$ entre la población $\Pi_t(\varepsilon)$, que al ser dos procesos estocásticos independientes, se cumple:

$$\begin{aligned}
m_t(\varepsilon) &= \frac{E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)] \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \\
&= \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon)] \\
&= \frac{n_t(\varepsilon)}{\pi_t(\varepsilon)} \cdot \lambda_t(\varepsilon) = i_t(\varepsilon) \cdot \lambda_t(\varepsilon)
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Este resultado es vital para el análisis porque muestra que la tasa de mortalidad proviene del producto de la magnitud de la incidencia $i_t(\varepsilon)$ por la fuerza de la letalidad $\lambda_t(\varepsilon)$, que son procesos independientes de ocurrencia, lo que permite estimaciones más precisas y la obtención de otros indicadores asociados.

En la Figura 3.28 se observa la evolución de la tasa de mortalidad de los ET totales y de los ATUS, escalada por millón de habitantes, durante el periodo 1997-2018 a nivel nacional. Como puede verse, ambas series poseen tendencias decrecientes, lo que se refleja en los coeficientes negativos de la línea de regresión, siendo la ordenada en el origen de ATUS apenas 37.5% del de los ET totales —60 y 160 defunciones para ATUS y ET totales, respectivamente—, mientras que la pendiente de la mortalidad por ET es más pronunciada que la de ATUS, lo que indica que ATUS disminuye con menor velocidad, lo que es cuestionable en el largo plazo, ya que este sesgo sobre su evolución se debe a la distorsión del periodo 2007-2011 ya señalado en forma reiterada.

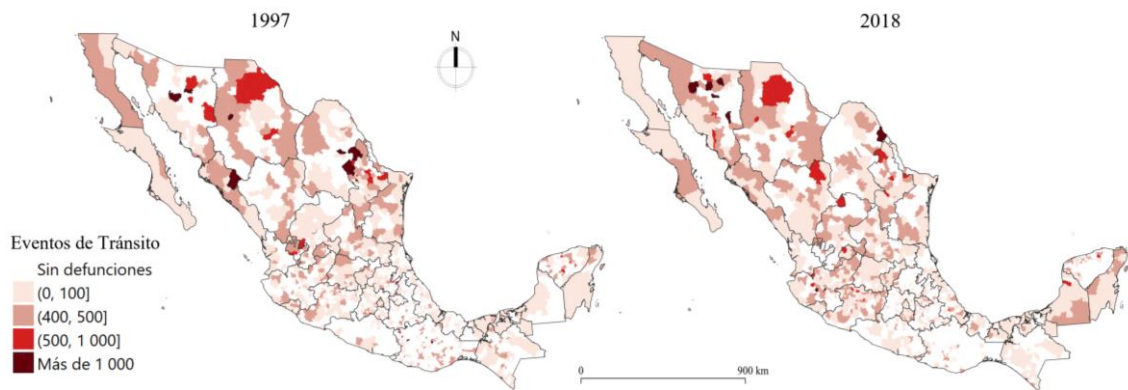
Figura 3.120. Evolución de la tasa de mortalidad de los ET en el periodo 1997-2018.



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En los mapas 3.5a y 3.5b se muestran las tasas de mortalidad por ET a escala municipal en dos años distintos: al inicio (1998) y al final del periodo de análisis (2018). Como puede observarse, la distribución territorial de la intensidad de las defunciones es muy similar y domina en el norte del país, mientras que, en el sureste mexicano, además, en varios municipios no hay registros de defunciones.

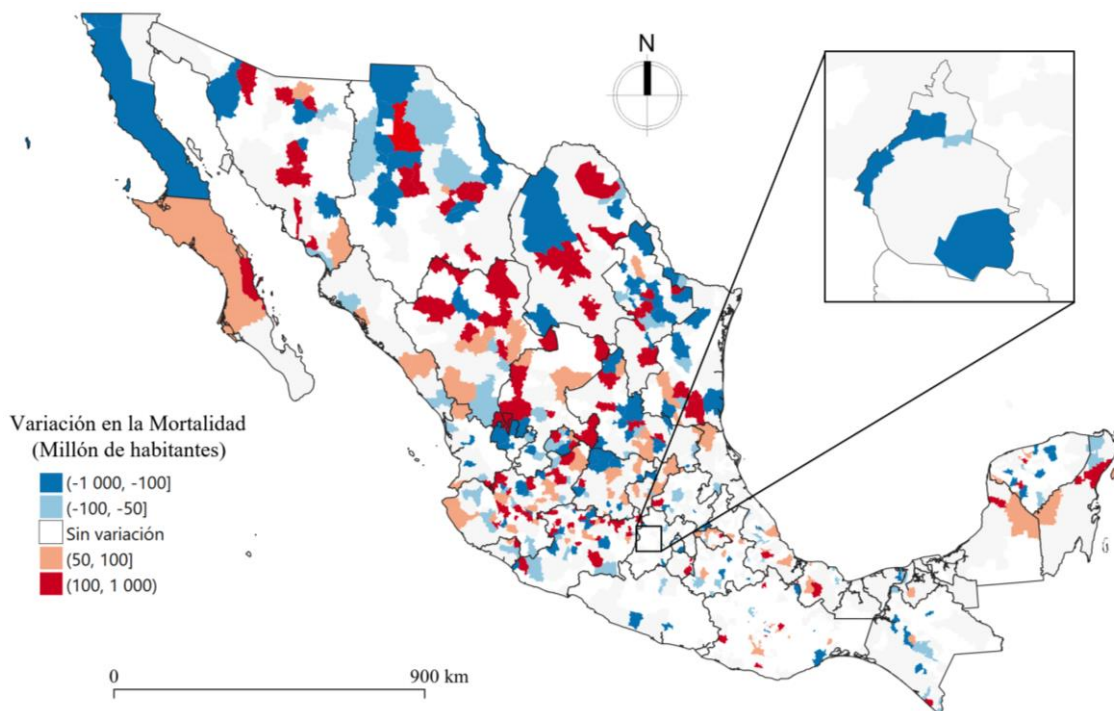
Mapas 3.121. a y 3.5b. Tasa de mortalidad por ET en el periodo 1997-2018, a nivel municipal

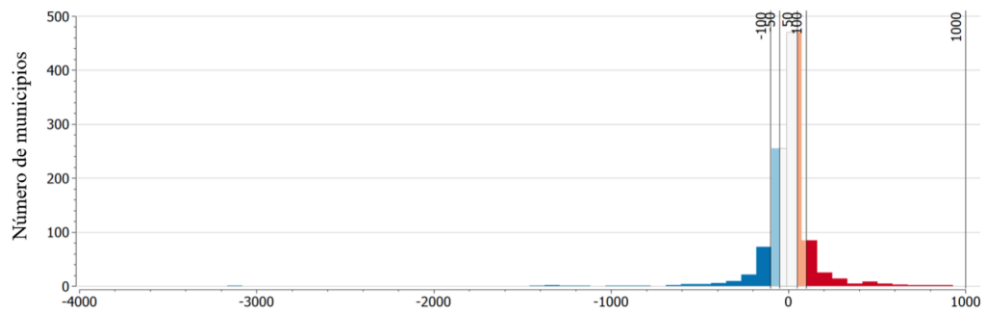


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Al analizar las variaciones en las ocurrencias de ET en los municipios del país, resulta interesante que un gran porcentaje no presenta variaciones significativas y que la distribución de las variaciones es simétrica respecto al cero, siendo el 80% inferior a 100 defunciones por millón de habitantes, como muestra el Mapa 3.6 con la diferencia entre las tasas de mortalidad por ET a nivel municipal entre 1997 y 2018.

Mapa 3.122. Variación de la tasa de mortalidad municipal por ET en el periodo 1997-2018





Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En este punto es importante volver a recordar la potencial falta de calidad en los registros, sobre todo en los que respecta a los *ET-No fatales* y, aún más, en los que solo producen daños. Esta situación sugiere estudiar de manera específica la letalidad de los *ET-Fatal*, pues de esta manera se podría comprender y estimar con mayor precisión el número de defunciones producidas por los ET.

Al considerar la falta de consistencia entre las entidades derivado del estudio de todos los ET registrados, se podrían obtener estimaciones más robustas, debido principalmente a que, además de ser una medida no monótona de la letalidad general, la estabilidad en el registro de los datos en esta variable es mucho mayor, lo que coadyuva a corregir el efecto del subregistro de ET y también a realizar una interpretación más intuitiva y menos sesgada sobre el efecto de los ET en la mortalidad general.

De este modo, emplear a los *ET-Fatal* para estimar los efectos de las diferentes acciones de gobierno y la mejora en los dispositivos y la tecnología también permite captar mejoras las propiedades de las variaciones en la letalidad mediante aquellos ET que efectivamente han sido fatales y eliminar las fuentes de distorsión proveniente de aquellos que no representaban una amenaza real a la vida y que, quizá por este motivo, no fueron adecuadamente registrados por los responsables en los distintos niveles de operación de los ET. Afortunadamente, a partir del planteamiento de la ecuación 2.23 y 3.17, es posible vincular el proceso de letalidad por *ET-Fatal* con el de mortalidad por *los mismos eventos* mediante la siguiente definición.

Definición 3.62. La *severidad del riesgo* $\mathcal{R}_t(\varepsilon)$ producida por las DT sobre una población definida en el espacio ε y el tiempo t , es la relación entre las defunciones generadas por las DT y los *ET-Fatal* registrados, por lo que se estima mediante la siguiente ecuación

$$\mathcal{R}_t(\varepsilon) = \frac{\mathcal{D}_t(\varepsilon)}{\mathcal{N}_t(\varepsilon; ET - Fatal)} = \frac{\mathcal{N}_t(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_t(\varepsilon; ET - Fatal)} = \frac{\mathcal{N}_t(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)}$$

Con esperanza está dada por

$$\begin{aligned}
 E[\mathcal{R}_t(\varepsilon)] = r_t(\varepsilon) &= E \left[\frac{\mathcal{N}_t(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)} \right] = \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)] \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)]} \\
 &= \frac{n_t(\varepsilon) \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon)}{n_t^F(\varepsilon)} = \frac{n_t(\varepsilon)}{n_t^F(\varepsilon)} \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon) \\
 &= \xi_t^F(\varepsilon) \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon) = \xi_t^F(\varepsilon) \cdot \lambda_t(\varepsilon) = \lambda_t^F(\varepsilon) \quad (3.31) \\
 \text{Con } \xi_t^F(\varepsilon) &= \frac{n_t(\varepsilon)}{n_t^F(\varepsilon)} \text{ y } \lambda_t(\varepsilon) \leq \lambda_t^F(\varepsilon) = r_t(\varepsilon)
 \end{aligned}$$

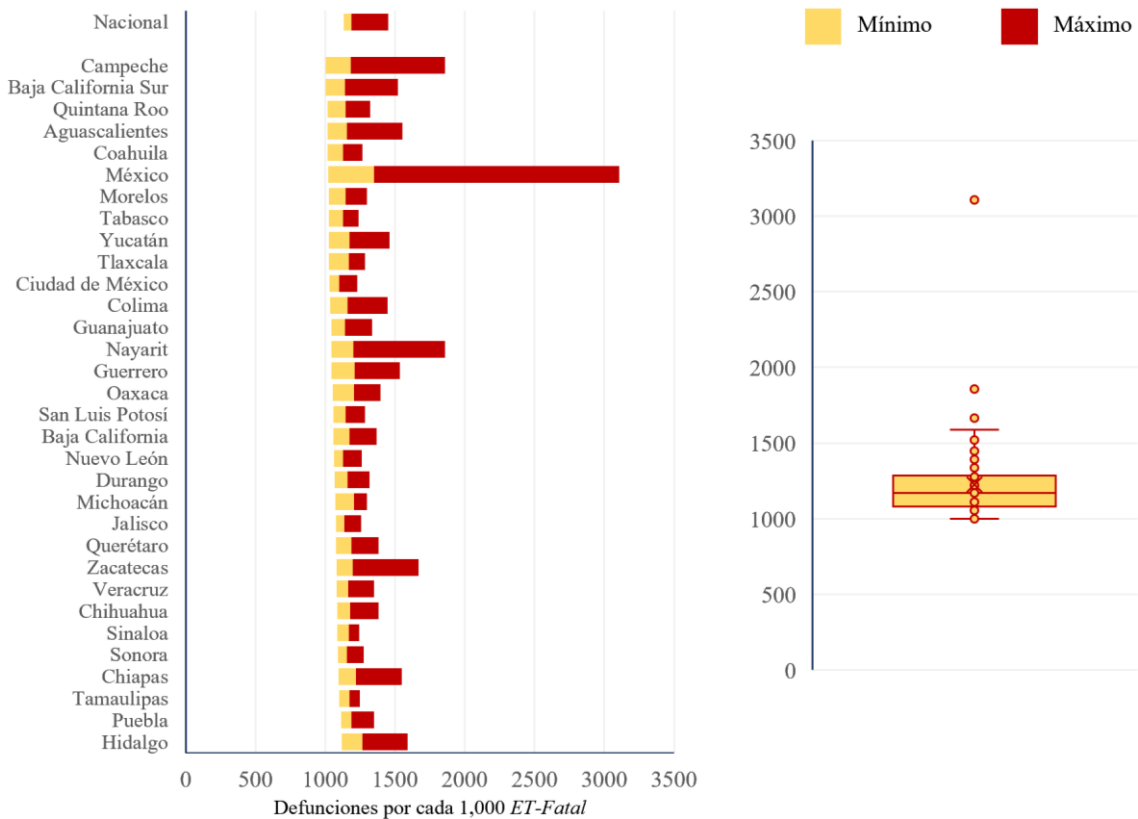
De este modo, la severidad del riesgo está dada por $\lambda_t^F(\varepsilon)$, la letalidad de los *ET-Fatal*, que estima qué tan letales son los ET en el plano individual, es decir, ante la ocurrencia de cada evento en su máximo impacto, reconociendo el número de muertes producidas por las DT asociadas más allá de su desagregación en clases de eventos, lo que después puede operacionalizarse al asociarlo con la velocidad del vehículo al momento del impacto y la seguridad de los vehículos involucrados. Una estrategia metodológica que también posibilita el diseño de experimentos aleatorios que den cuenta de la eficacia de ciertas medidas y dispositivos en la preservación de la vida.

En la Figura 3.29 se observa el rango de variación del número de defunciones por cada 1,000 *ET-Fatal*; al inicio de la barra amarilla se encuentra el mínimo de la serie de tiempo con estimaciones anuales, entre las barras se ubica el promedio de cada entidad, y al final de la barra roja se expresa el valor máximo de cada caso.

Como puede observarse, los registros a nivel nacional señalan que el año con menor riesgo fue en 2018 con 1,131 por cada 1,000 *ET-Fatal*, el promedio fue de 1,185 y el máximo de 1,399, no obstante, a nivel estatal la letalidad mínima se observó en Baja California Sur y Campeche, con 1 defunción por cada *ET-Fatal*,

Llama la atención el caso del Estado de México, que en 2011 registró 3,187 defunciones por cada 1,000 *ET-Fatal*, exhibiendo un promedio de 166 (16.6%) muertes adicionales al promedio nacional, lo que multiplicado por 4,676 eventos, que es el número promedio de *ET-Fatal* observados en esta entidad anualmente, supone 776 fallecimientos adicionales a los que se pueden observar a nivel nacional, lo que a su vez representa el 13.9% de las defunciones anuales por ET.

Figura 3.123. Rango de la *severidad del riesgo* a nivel estatal en el periodo 1997-2018

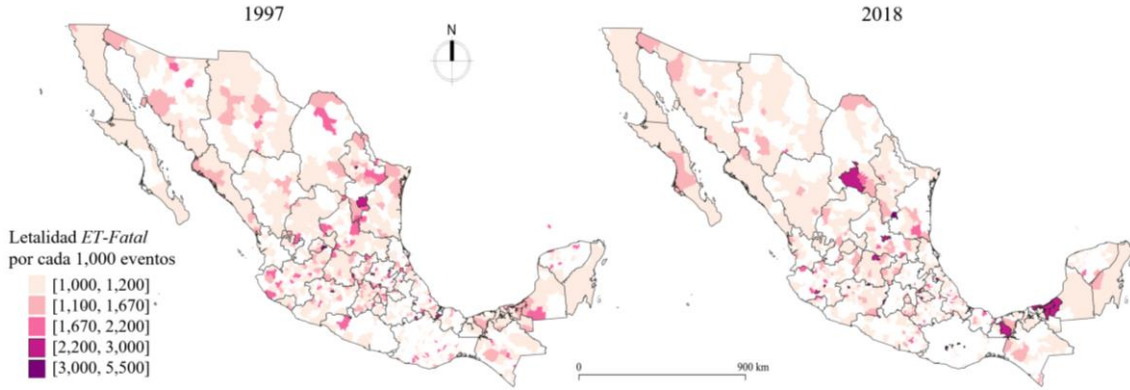


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Estas cifras son realmente alarmantes si se tiene en cuenta que el Estado de México cuenta con el 13.6% de la población y que solo ha registrado el 9.1% de las defunciones por ET durante el periodo 1997-2018 y un promedio anual de 8,6%, motivo suficiente para analizar el dramático cambio observado durante el periodo 2007-2011, en donde promedia 16.1% del total nacional, prácticamente el doble de su ‘tasa histórica’ y más de tres puntos porcentuales sobre su ‘tasa natural’.

Por su parte, los Mapas 3.7a y 3.7b muestran el cambio en la letalidad entre dos años: 1997 y 2018. Como puede observarse, la distribución es más o menos homogénea, no obstante, en el Mapa que corresponde a 2018 aparecen menos municipios con alto nivel de letalidad. No resulta una sorpresa que el sureste mexicano tenga tasas más bajas en el análisis ATUS ya que gran parte de su territorio es rural y, por tanto, la integración de los datos en sus municipios recaba una proporción menor de eventos.

Mapas 3.124a y 3.7b. Letalidad municipal por *ET-Fatal* en los años 1997 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

La intensidad con que ocurren los diversos tipos de discordancias de tránsito es fundamental en el estudio de los ET y la dinámica que los rige, de ahí la importancia de definir las propiedades analíticas de la intensidad del riesgo.

A partir de los resultados anteriores es posible definir más propiedades de la intensidad del riesgo para estimarla adecuadamente, incluso, sin contar con datos de calidad sobre el número total de ET, lo que se puede lograr al utilizar el resultado del siguiente replanteamiento de la ecuación (3.30):

$$\begin{aligned}
 m_t(\varepsilon) &= \frac{E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)]} \cdot \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)] \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \\
 &= \frac{E[\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \cdot \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_t^F(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET)}(\varepsilon)] \\
 &= i_t^F(\varepsilon) \cdot \xi_t^F(\varepsilon) \cdot d_t^{(ET)}(\varepsilon) = i_t^F(\varepsilon) \cdot \lambda_t^F(\varepsilon)
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

La ecuación 3.32 implica que la intensidad del riesgo también es el producto de la magnitud de la incidencia de los *ET-Fatal*, $i_t^F(\varepsilon)$, por la fuerza de la letalidad de esta clase de ET, dada por $\lambda_t^F(\varepsilon)$. Lo que propone la siguiente igualdad

$$m_t(\varepsilon) = i_t(\varepsilon) \cdot \lambda_t(\varepsilon) = i_t^F(\varepsilon) \cdot \lambda_t^F(\varepsilon) \tag{3.33}$$

De lo que se deduce que

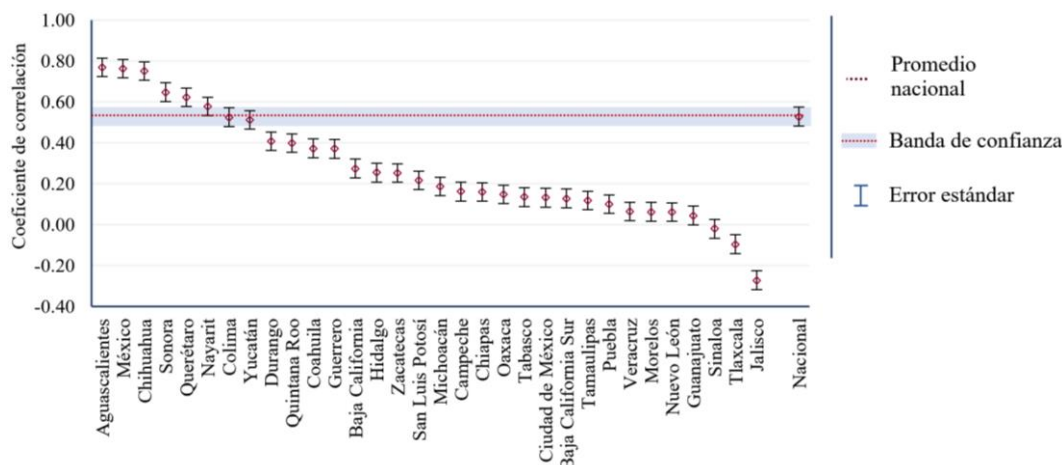
$$\lambda_t^F(\varepsilon) = \frac{i_t(\varepsilon)}{i_t^F(\varepsilon)} \cdot \lambda_t(\varepsilon) = f_t(\varepsilon) \cdot \lambda_t(\varepsilon) \quad \text{con } f_t(\varepsilon) = \frac{i_t(\varepsilon)}{i_t^F(\varepsilon)}$$

En donde $f_t(\varepsilon)$ es un factor que compensa la falta de concurrencia entre las mediciones de ET y *ET-Fatal*.

Este resultado es particularmente importante porque asegura que ambas medidas son equivalentes para estimar el riesgo de la población y que no hay pérdida informativa al utilizar solamente los *ET-Fatal*.

En la Figura 3.30 se observa el coeficiente de correlación entre las series anuales de letalidad por ET y letalidad por ET-Fatal, durante el periodo 1997-2018, para todas las entidades federativas. La concurrencia entre ambas medidas es relevante porque señala en qué medida los datos en uno y otro ámbito muestran la misma realidad, lo cual otorga indicios sobre la confianza estadística en cada subconjunto de datos, sobre todo cuando se tiene la intención de realizar extrapolaciones e inferencias.

Figura 3.125. Correlación entre la letalidad por ET y por *ET-Fatal* a nivel estatal, 1997-2018

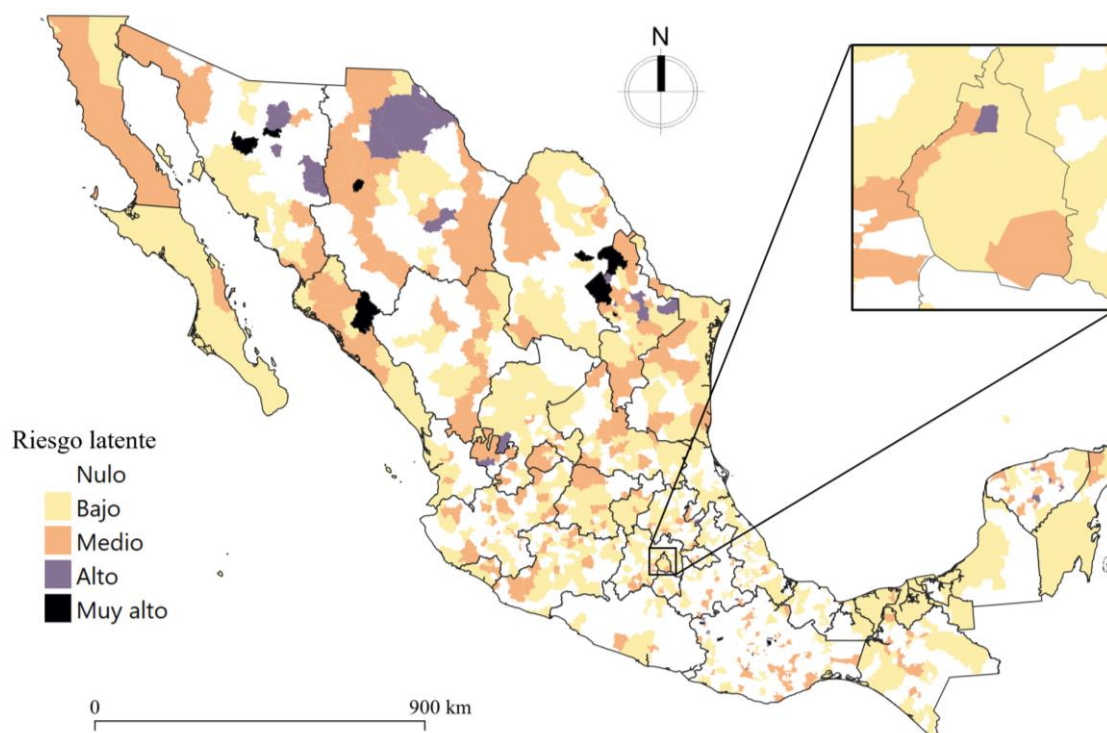


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, el coeficiente de correlación a nivel nacional es $R=0.53$, un valor positivo, pero bajo, que indica deficiencias entre las métricas, proveniente de la diversidad de fuentes y procedimientos que producen datos con distinta calidad. Por ejemplo, en Aguascalientes, $R=0.77$; en México, $R=0.76$ y en Chihuahua, $R=0.75$; por lo contrario, en algunos estados como Sinaloa, Tlaxcala y Jalisco el coeficiente es negativo, $R=-0.09$, $R=-0.09$ y $R=-0.27$, respectivamente, lo que implica una ausencia absoluta de relación y la imposibilidad de realizar inferencias sobre una a partir de la otra.

En el Mapa 3.8 se muestran los niveles de riesgo latente a nivel municipal en 2018, clasificados como *Nulo*, *Bajo*, *Medio*, *Alto* y *Muy alto*, como puede verse, son pocos los municipios en los que nivel de riesgo latente es alto o muy alto y se concentran principalmente en el norte, reiterando que en el sur hay pocos municipios con altas concentraciones de ET fatales y, relativamente, pocas defunciones por esta causa.

Mapa 3.126. Niveles de *riesgo latente* en los municipios en 2018

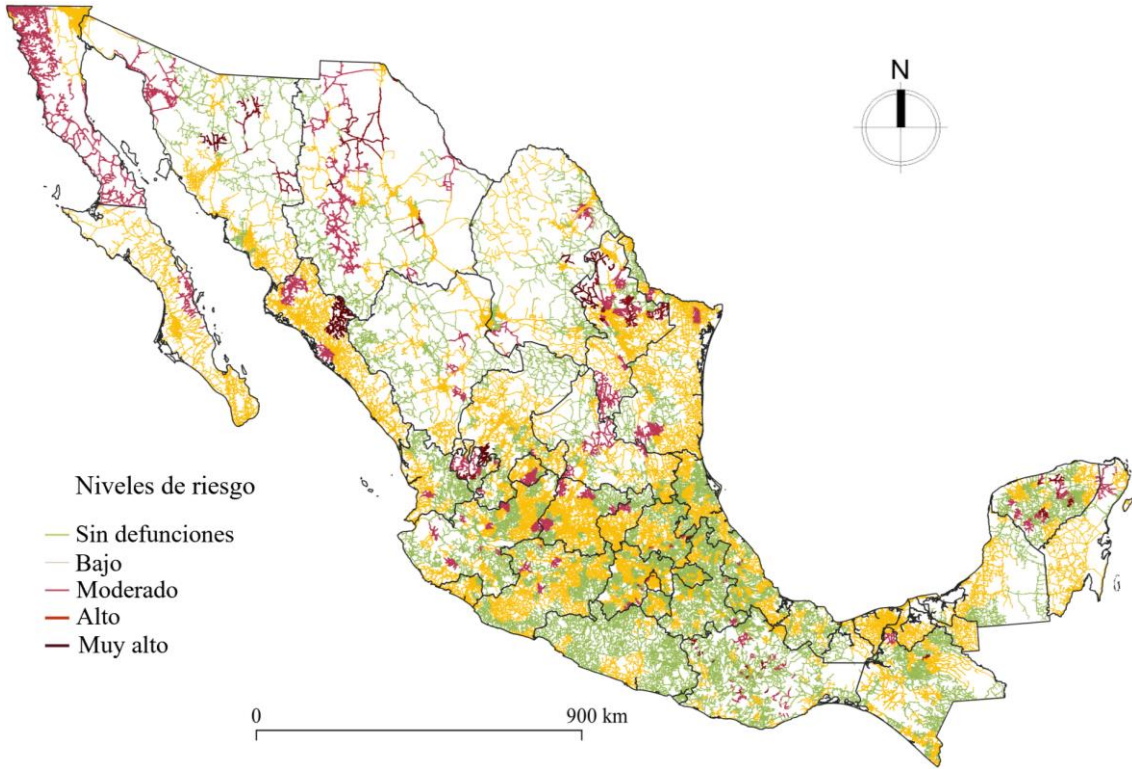


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con el fin de estimar las probabilidades de ocurrencia en las distintas zonas de la red vial e inferir aspectos relacionados con las propiedades o la lógica de circulación, flujo u otras relaciones posibles o dependientes de la topología de la red vial, es posible intersectar dos capas con distinta geometría mediante análisis de localización y asignar diversos atributos de los municipios a su red vial. Este procedimiento tiene sentido porque los ET ocurren en su gran mayoría en la red vial, sobre todo en el ámbito urbano, así que gran parte del territorio no es susceptible de ser representado estadísticamente en los distintos indicadores, por lo que se puede caracterizar al territorio a través de su red y excluir de su representación al que carece de transporte.

Desde luego, el algoritmo para llevar a cabo este proceso tiene diversas complejidades, el desafío reside en calcular una intersección geométrica de las entidades de entrada, por ejemplo, municipios, con el fin de superponer las ‘capas de riesgo’ sobre la infraestructura carretera. De este modo, en el Mapa 3.9 se representan las carreteras del país en color graduado de acuerdo con los niveles promedio de *riesgo latente* de la serie 1997-2018, lo que muestra los niveles de riesgo latente en el sistema de transporte de México.

Mapa 3.127. Niveles de *riesgo latente* en el sistema de transporte de México, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Definición 3.63. El número de defunciones por ET, ocurridas en una cohorte de personas en edad α en el año t , dentro de los siguientes n años sobre el espacio ε , están dados por

$$E[n\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)] = n\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (3.34)$$

Definición 3.64. La probabilidad de que una persona de edad α , ubicada en el espacio ε y el tiempo t , fallezca por un ET antes de llegar al tiempo $(\alpha + 1)$ se denota por

$$q_{\alpha_t}(\varepsilon) = \frac{\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \quad (3.35)$$

Definición 3.65. La probabilidad de que una persona de edad α , ubicada en el espacio ε y el tiempo t , fallezca por un ET en algún momento durante los siguientes n años, se denota por

$${}_nq_{\alpha_t}(\varepsilon) = \frac{n\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \quad (3.36)$$

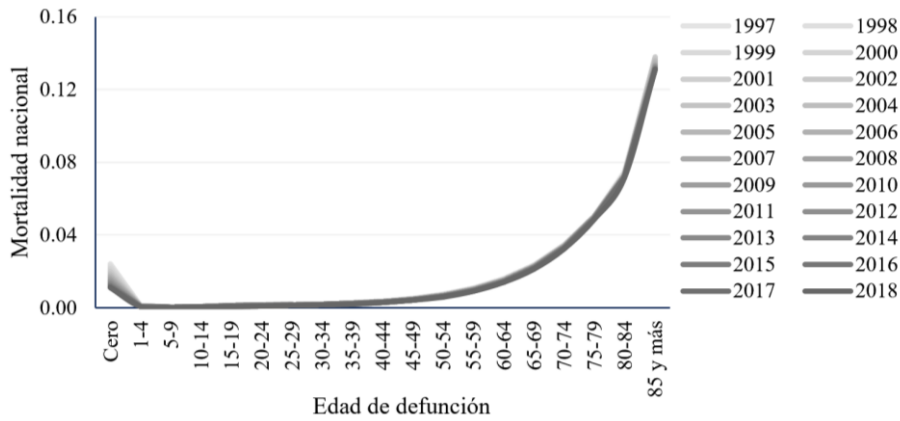
De manera que ${}_nq_{\alpha_t}(\varepsilon)$ tiene una relación dinámica con la población dada por $\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y las defunciones $n\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, lo que permite estudiar las defunciones por ET en una población de cualquier edad en un territorio acotado ε durante un intervalo arbitrario de tiempo t en forma analítica.

Para conocer la manera en que se distribuyen las defunciones en el país y cómo es su evolución, se puede graficar la tasa de mortalidad de todas las causas en México con la edad en el eje horizontal

para todos los años del periodo de estudio. En la Figura 3.31 se muestra la representación de la mortalidad para el periodo 1997-2018, en ella, se observa cómo los niños en el primer año exhiben un alto nivel de mortalidad, lo que ha disminuido enormemente con el paso del tiempo. Por el contrario, existe una mortalidad muy baja hasta los 39 años, lo cual comienza a elevarse gradualmente hasta que en el grupo etario 65-69 se equipara la intensidad a la de los menores de 1 año, para después crecer exponencialmente.

La caracterización de poblaciones a través de sus fuerzas de mortalidad es una forma unívoca de estimar sus funciones de distribución y supervivencia, por lo que basta tener una serie de datos para cualquiera de las funciones para lograr reconstruir las otras dos.

Figura 3.128. Defunciones por todas las clases de ET, desagregado por edad, a escala nacional, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Definición 3.66. La *tasa de mortalidad de las DT* en un grupo de población en edad α sobre el espacio ε y el tiempo t , denotada por $m_{\alpha_t}(\varepsilon)$, es la *intensidad de las defunciones por ET*, generada por el proceso de riesgo operando en una población definida sobre el espacio ε y el tiempo t , cuya estimación distribuye el riesgo $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ que origina las $\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ entre la población $\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)$, que al ser dos procesos estocásticos independientes, se cumple:

$$\begin{aligned}
 m_{\alpha_t}(\varepsilon) &= \frac{E[\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon)] \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET_j)}(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \\
 &= \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET_j)}(\varepsilon)] = \frac{n_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \cdot \lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) = i_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

Que puede representarse también como el producto de la magnitud de la incidencia $i_{\alpha_t}(\varepsilon)$ por la fuerza de la letalidad $\lambda_{\alpha_t}(\varepsilon)$. La intensidad del riesgo posee una propiedad muy relevante que permite

estimarla adecuadamente incluso sin contar con datos de calidad sobre el número total de ET, lo cual se verifica mediante el siguiente replanteamiento de la ecuación 3.37:

$$\begin{aligned}
 m_{\alpha_t}(\varepsilon) &= \frac{E[\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)]} \cdot \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon)] \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \\
 &= \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \cdot \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)] \\
 &= i_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot \xi_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot d_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon) = i_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot \lambda_{\alpha_t}^F(\varepsilon)
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

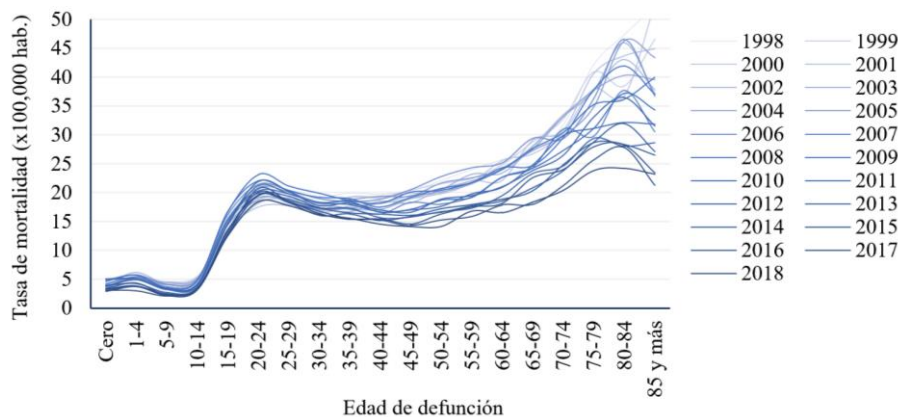
Resultado que puede obtenerse al calcular el producto de la magnitud de la incidencia, pero ahora de los ET-Fatal, $i_{\alpha_t}^F(\varepsilon)$, por la fuerza de la letalidad de esta clase de ET, estimada por $\lambda_{\alpha_t}^F(\varepsilon)$. Lo que demuestra la igualdad del producto de las fuerzas

$$m_{\alpha_t}(\varepsilon) = i_t(\varepsilon) \cdot \lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) = i_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot \lambda_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \tag{3.39}$$

Como se ha visto, la tasa de mortalidad provee de información muy valiosa sobre el fenómeno que afecta a una población. En la Figura 3.32 se muestra que los menores de 14 años poseen la menor mortalidad de todos los grupos etarios (4-5 defunciones por cada 100,000 habitantes), lo que hace sentido debido a que participan mucho menos en las actividades de transporte y, como se verá más adelante, casi todas las defunciones se dan como peatones.

Resulta de particular interés la velocidad con la que crece la fuerza de mortalidad de 15 a 20 años hasta superar las 24 defunciones por cada 100,000 habitantes y su posterior descenso en personas mayores a los 60 años. Las distintas líneas de la gráfica también muestran cómo la mortalidad ha ido disminuyendo con el tiempo, por lo cual las cohortes más recientes tienen una intensidad cada vez menor en todas las edades, mostrando una disminución más pronunciada al pasar los 30 años, lo que sugiere estudios más profundos para comprender este cambio de comportamiento poblacional y si este se relaciona con la movilidad y el tipo de actividades profesionales.

Figura 3.129. Defunciones por ET, desagregado por edad. Nacional, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con base en estos resultados, ya es posible producir las tablas de mortalidad que permiten realizar inferencias y comparar variaciones de manera objetiva, lo que se complementa con las siguientes probabilidades.

Definición 3.67. La probabilidad marginal de que una persona de edad α fallezca por una causa distinta a un ET durante los siguientes n años en el espacio ε , se denota por

$${}_nq_{\alpha_t}^{(\tau/ET)}(\varepsilon) = \frac{{}_n\mathbb{d}_{\alpha_t}(\varepsilon) - {}_n\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} = \frac{{}_n\mathcal{d}_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) - {}_n\mathcal{d}_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \quad (3.40)$$

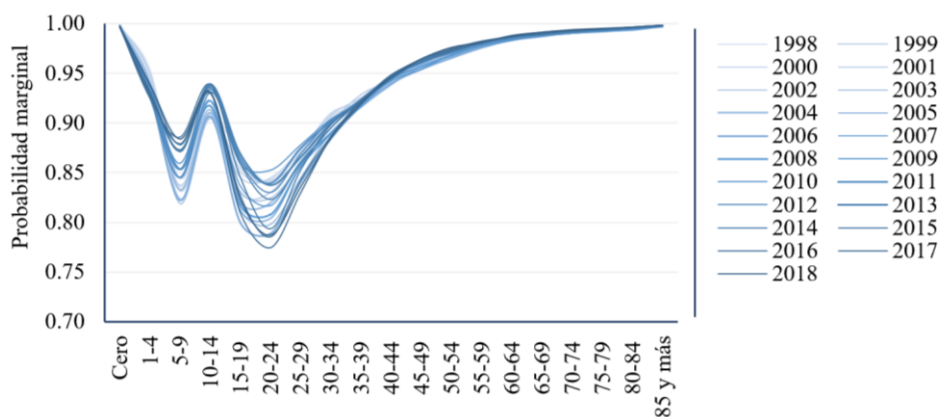
Por lo que se cumple que

$${}_nq_{\alpha_t}^{(\tau/ET)}(\varepsilon) + {}_nq_{\alpha_t}(\varepsilon) = {}_nq_{\alpha_t}^{(\tau)}(\varepsilon) \quad (3.41)$$

Como puede observarse, la ecuación 3.41 implica que el número de defunciones por ET es el resultado de la agregación de múltiples procesos estocásticos que cambian dinámicamente en su frecuencia y severidad. Algunas veces, para estimar el efecto de los ET en la mortalidad general, es necesario efectuar el cálculo de las probabilidades marginales de los ET, o de su complemento. Por ejemplo, ¿qué pasaría si los *ET-Fatal* no existieran? o ¿cómo variarían el número de defunciones por cada décima en la fuerza de mortalidad?

En estadística, las variables marginales son aquellas que se pueden apartar del conjunto para obtener estimaciones ‘sin ellas’. En la Figura 3.33 se muestra el efecto de marginar las defunciones por ET en las probabilidades de fallecer por cualquier otra causa. Como puede observarse, el efecto en los menores de un año es casi nulo, por lo que la probabilidades de que las defunciones sean por cualquier otra causa es prácticamente 1. Por lo contrario, en los grupos etarios de 5 a 30 son sumamente significativas, dejando una probabilidad de entre 0.77 y 0.85 que señala los valores más bajos en el grupo entre 20 y 24 años, lo que comienza a aumentar de nuevo con la edad de los fallecidos hasta acercarse a asintóticamente al valor máximo de 1, después de los 70 años.

Figura 3.130. Probabilidades marginales de defunción por ET, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de las probabilidades definidas en este apartado, es posible construir arreglos matriciales para ordenar las probabilidades de defunción y supervivencia para una familia de cohortes. Si en estos arreglos no se considera el motivo del deceso, se obtiene una tabla ampliamente conocida como *tabla de mortalidad*.

Cuando el motivo de las defunciones se desagrega en causas específicas, el arreglo es conocido como *tabla de decrementos múltiples*, lo que se aborda con detalle en el capítulo 4. Ambos instrumentos son necesarios para estimar modelos de supervivencia y de dinámica poblacional, así como sus efectos en distintas esferas.

3.3 Tiempos de latencia

Para distinguir qué tipo de fenómeno afecta a una población entera, es sumamente útil investigar la distribución del riesgo entre distintos grupos poblacionales, comenzando por los etarios, así como sus propiedades dinámicas, las cuales refieren a su evolución en el tiempo, para lo cual se desarrollan los siguientes conceptos.

Definición 3.68. La letalidad del riesgo en un grupo de edad α sobre el espacio ε y el tiempo t , denotada por $\Lambda_{\alpha_t}(\varepsilon)$, es la relación entre las defunciones generadas por las DT y los *ET-Fatal* registrados en el grupo de edad α , lo que se estima mediante la siguiente ecuación

$$\Lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) = \frac{\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon; ET - Fatales)} = \frac{\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon; ET - Fatales)} = \frac{\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)}$$

Con esperanza está dada por

$$\begin{aligned} E[\Lambda_{\alpha_t}(\varepsilon)] &= E\left[\frac{\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)}{\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)}\right] = \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}] \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)]}{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}^F(\varepsilon)]} \\ &= \frac{n_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot d_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon)}{n_{\alpha_t}^F(\varepsilon)} = \frac{n_{\alpha_t}(\varepsilon)}{n_{\alpha_t}^F(\varepsilon)} \cdot d_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon) \\ &= \xi_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot d_{\alpha_t}^{(ET)}(\varepsilon) = \xi_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \cdot \lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) = \lambda_{\alpha_t}^F(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Con $\xi_{\alpha_t}^F(\varepsilon) = \frac{n_{\alpha_t}(\varepsilon)}{n_{\alpha_t}^F(\varepsilon)}$ y $\lambda_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq \lambda_{\alpha_t}^F(\varepsilon)$

Definición 3.69. La *tasa de mortalidad de las DT* en un grupo de edad α sobre el espacio ε y el tiempo t , denotada por $m_{\alpha_t}(\varepsilon)$, es la fuerza con la que ocurren las defunciones por ET en el año t , que es generada por el proceso de riesgo operando en una población definida sobre el espacio ε y el tiempo t , cuya estimación distribuye el riesgo $\mathcal{R}_t(\varepsilon)$ que origina las $\mathcal{D}_t(\varepsilon)$ entre la población $\Pi_t(\varepsilon)$, tal que

$$m_{\alpha_t}(\varepsilon) = \frac{d_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_t(\varepsilon)} \quad (3.43)$$

$$\text{como } E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)] = \sum_{\alpha=0}^{\omega} E[\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)] \wedge m_t(\varepsilon) = E[\mathcal{D}_t(\varepsilon)] \cdot E[\Pi_t(\varepsilon)]^{-1}$$

Entonces

$$m_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} E[\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)] \cdot E[\Pi_t(\varepsilon)]^{-1} = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \frac{d_{\alpha_t}(\varepsilon)}{\pi_t(\varepsilon)}$$

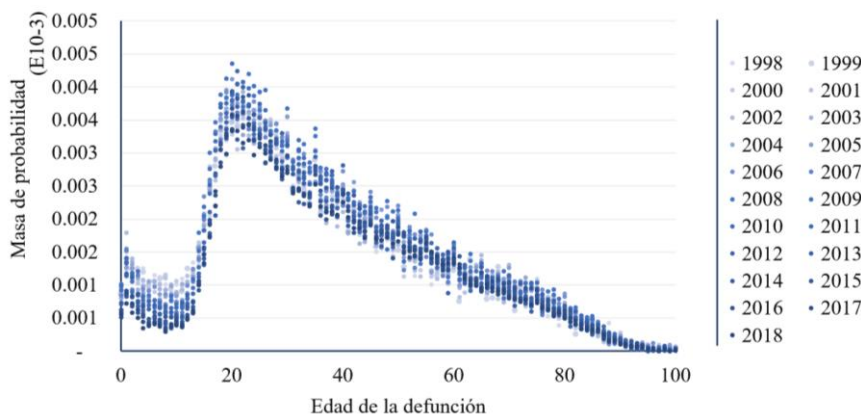
$$\Rightarrow m_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} m_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (3.44)$$

El resultado de la ecuación 3.44 demuestra que la intensidad del riesgo por DT es aditiva respecto a la edad de las personas. De este modo, la suma de las intensidades del riesgo de cada edad α en el espacio ε y en el año t representa la intensidad total de las defunciones que aquejan a una sociedad, la cual está dada por la tasa de mortalidad. A partir de la ecuación 3.43 y 3.44, se deduce que las probabilidades condicionales de que, una vez ocurrida la defunción por ET, el fallecimiento se dé en una persona con edad específica, se estiman mediante

$$f_{\mathcal{D}_\alpha}(\varepsilon, t) = \frac{m_{\alpha_t}(\varepsilon)}{m_t(\varepsilon)} \quad (3.45)$$

En la Figura 3.34 se muestran las masas de probabilidad condicional para todas las edades en cortes anuales para las series 1998-2018. Como puede observarse, existe una situación invariante respecto a la distribución de frecuencias, lo que permite estimar leyes analíticas que coadyuven a su tratamiento paramétrico.

Figura 3.131. Intensidad del riesgo por ET, series 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como la ecuación 3.44 permite estimar las defunciones futuras por ET a cualquier edad mediante la proyección de la intensidad del riesgo por ET, el tamaño de población también puede proyectarse mediante la siguiente ecuación

$$d_{\alpha\tau}(\varepsilon) = m_{\alpha\tau}(\varepsilon) \cdot \pi_t(\varepsilon) \quad (3.46)$$

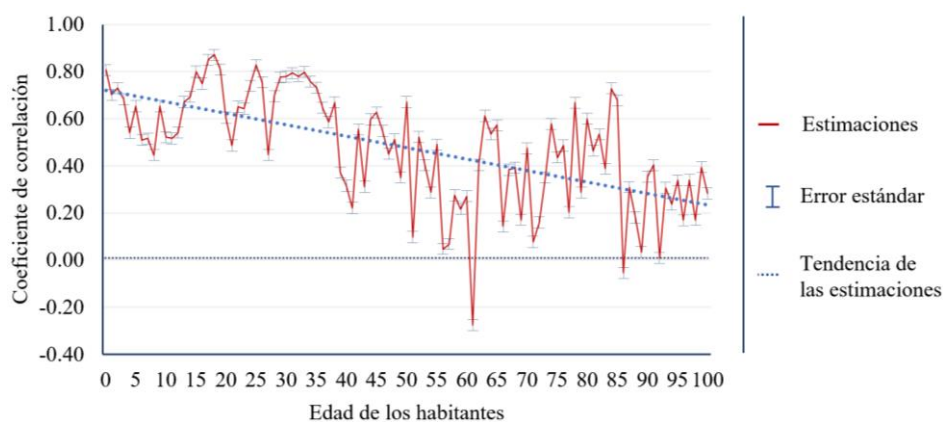
Por este motivo, se puede utilizar a la ecuación 3.46 para estimar las probabilidades de transición, o bien, analizar la evolución de los grupos etarios a través de la serie $\{f_{D_\alpha}(\varepsilon, \tau)\} \forall \tau$ y la tasa de mortalidad general.

$$d_{\alpha\tau}(\varepsilon) = d_\tau(\varepsilon) \cdot f_{D_\alpha}(\varepsilon, \tau) \Rightarrow \sum_{\alpha=0}^{\omega} f_{D_\alpha}(\varepsilon, t) = 1$$

A pesar de que la tasa de mortalidad por ET es una combinación lineal de las intensidades de riesgo por ET, su evolución en el tiempo no es monótona para todas las edades, las variaciones disímiles en el tiempo pueden señalar cambios en las conductas de grupos etarios y distintas condiciones de participación y aversión al riesgo. En la Figura 3.35 se muestra la estimación del coeficiente de correlación entre las series de tiempo de las intensidades de riesgo en cada edad y la tasa de mortalidad, para el periodo 1998-2018.

Como puede verse, la relación es positiva para la mayoría de los años —exceptuando la edad 60 en forma atípica ($R=-0.28, p<0.001$), siendo más estrecha entre los menores de 1 año ($R=0.81, p<0.001$) y los jóvenes entre 17-18 años ($R=0.87, p<0.001$).

Figura 3.132. Correlación entre intensidad del riesgo y tasa de mortalidad por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

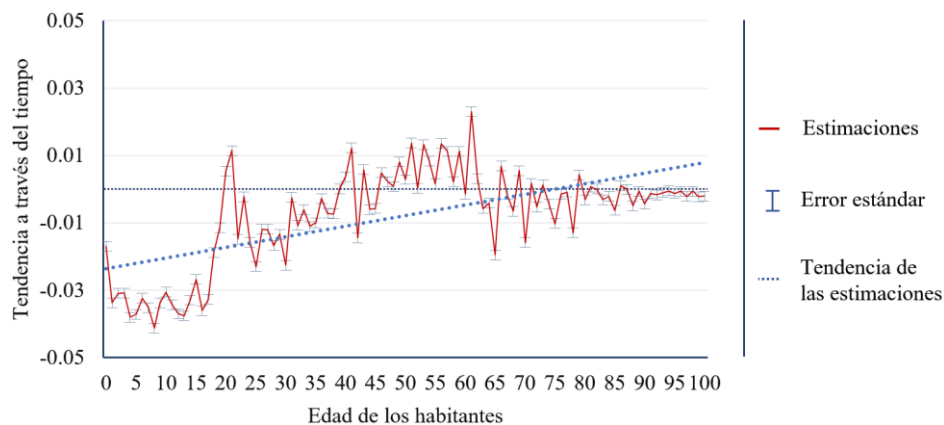
Por supuesto, la evolución más probable es distinta entre los grupos etarios, por lo que vale la pena analizar las tendencias en cada caso. La Figura 3.36 muestra los coeficientes de tendencia de las variaciones para cada edad. Esta análisis permite anticipar hacia dónde se dirigen las cifras de defunciones de los grupos etarios, confirmar las potenciales vidas salvadas y anticipar potenciales problemas en el aumento de defunciones en el territorio.

Por ejemplo, el hecho de que los coeficientes sean insistentemente decrecientes en los jóvenes de 18 años y menos, permite confirmar que en este grupo no solo ha disminuido la intensidad de las

defunciones, sino que seguirá disminuyendo en el futuro, por lo que su tasa de mortalidad continuará decreciendo, lo que puede deberse a distintos motivos, lo que permite concluir que su inclusión en grupos prioritarios de atención y el endurecimiento de las medidas de seguridad para los menores —tales como la prohibición de viajar en el asiento delantero, el uso obligatorio del cinturón y la disminución de las posibilidades de conducir sin licencia— podrían estar surtiendo un efecto muy positivo en la disminución de las fatalidades.

Asimismo, el grupo de personas entre 25 y 40 años también muestra una tendencia negativa que, aunque más moderada, parece tener principios de actuación que aminoran el riesgo, lo que desaparece a partir de la edad 40 con coeficientes crecientes hasta edad 60 y una posterior disminución que oscila alrededor del cero hasta alcanzar la edad ω .

Figura 3.133. Pendiente de la tendencia de las variaciones por grupo de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otro de los desafíos de la modelación matemática consiste en hallar modelos de distribución de probabilidades que representen el comportamiento teórico de los fenómenos aleatorios, modelar lo observable en forma ‘estadísticamente aceptable’ es una necesidad básica para el científico empírico.

Desde luego, para el tratamiento de la función de densidad de las defunciones $f_{\mathcal{D}_\alpha}(\varepsilon, t)$ existe una gran cantidad de distribuciones teóricas plausibles, no obstante, para modelar estos conjuntos de datos, es esencial una interpretación intuitiva de sus parámetros que sea congruente con la naturaleza del fenómeno, lo que ayuda a evitar la tentación de elegir la función solo por sus propiedades de ajuste ignorando la pertinencia de su especificación.

Para atender estos aspectos vitales, entre las diversas leyes de distribución estadística que ajustan razonablemente bien a los datos, se ha elegido a la ecuación de Weibull²⁷ por ser una alternativa muy solvente para abordar este punto, ya que posee múltiples ventajas paramétricas acompañadas de fuertes evidencias que sustentan que esta distribución presenta muy buen ajuste estadístico aún con muestras extremadamente pequeñas (Pratt & Whitney, 2017).

En relación con este último punto, desde una aproximación teórica, E.J. Gumbel (2012) demostró que la distribución de Weibull y las distribuciones de valores extremos de Tipo III son las mismas, con lo cual también demostró que, si un sistema tiene múltiples modos de falla, el tiempo para el primer fallo se modela muy bien mediante la distribución de Weibull. En el contexto de los ET, la primer falla se traduce en una defunción se trata de un *ET-Fatal*, como es el caso de los registros que realiza INEGI sobre las personas involucradas.

La distribución de Weibull se caracteriza a partir de sus parámetros de *forma*, *escala* y *umbral* (Rinne, H., 2008). El parámetro de forma describe la manera en que se distribuyen los datos y el lado del sesgo; está definido como el exponente de la función potencial y determina la tasa de defunciones. Por su parte, al parámetro de escala se le conoce como vida característica y corresponde al percentil 63.2 de los datos ordenados. La escala define la posición de la curva mediante el valor que toma el umbral de manera similar a como el promedio aritmético define a una curva gaussiana.

La ecuación que define a la función de distribución de Weibull está dada por

$$F_T(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (3.47)$$

Y su función de densidad está dada por

$$f_T(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (3.48)$$

con $t \geq 0$, $\beta > 0$ y $\eta > 0$, denotando η el parámetro de escala y β el parámetro de forma.

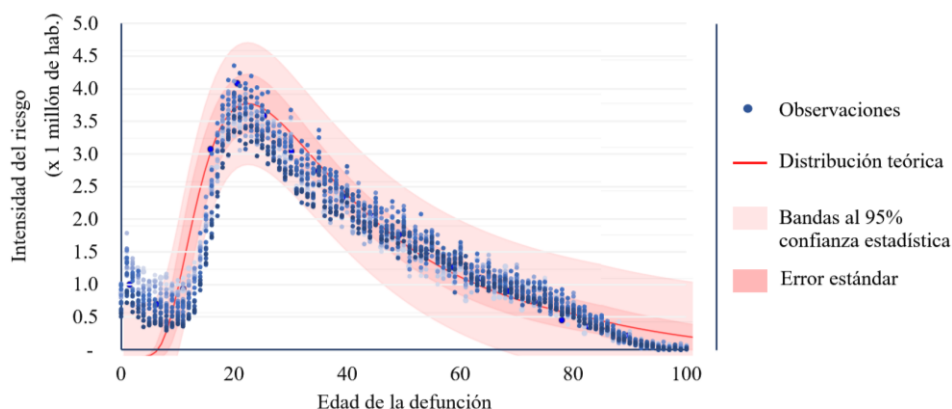
El parámetro del umbral o localización describe un desplazamiento de la distribución alejándose del instante 0. Un valor negativo del umbral desplaza la distribución hacia la izquierda, mientras que un valor umbral positivo desplaza la distribución hacia la derecha, desde luego, todos los datos deben ser mayores que el valor umbral. La distribución de Weibull de 2 parámetros es igual a la distribución de Weibull de 3 parámetros con un valor umbral de cero, al modelar el tiempo de vida de las personas, en general, el parámetro umbral siempre debería comenzar en el instante 0.

²⁷ Waloddi Weibull inventó la distribución de Weibull en 1937 y afirmó que su distribución se aplicaba a una amplia gama de problemas.

En la Figura 3.37 se modela la función de densidad $f_{D_\alpha}(\varepsilon, t)$, los círculos azules refieren a las observaciones realizadas durante el periodo 1998-2018, el color graduado de los círculos refiere al paso del tiempo, del celeste al azul oscuro; la línea sólida roja es la distribución de probabilidades obtenida mediante el modelo con función de densidad de Weibull, una distribución teórica que corresponde al mejor ajuste estadístico con sus respectivas bandas de error estándar en el que las bandas más amplias corresponden a las probabilidades de obtener observaciones en el rango con una confianza estadística de 95%, lo que significa que la probabilidad de observar valores fuera de ellas es inferior al 0.05.

En el gráfico se observa el inicio y fin de la distribución se aleja de los puntos observados, lo que resulta en un exceso de defunciones en los primeros años y un descenso más pronunciado en los últimos de la vida respecto a la distribución teórica.

Figura 3.134. Ajuste paramétrico de la frecuencia relativa de las defunciones por edad, 1998-2018



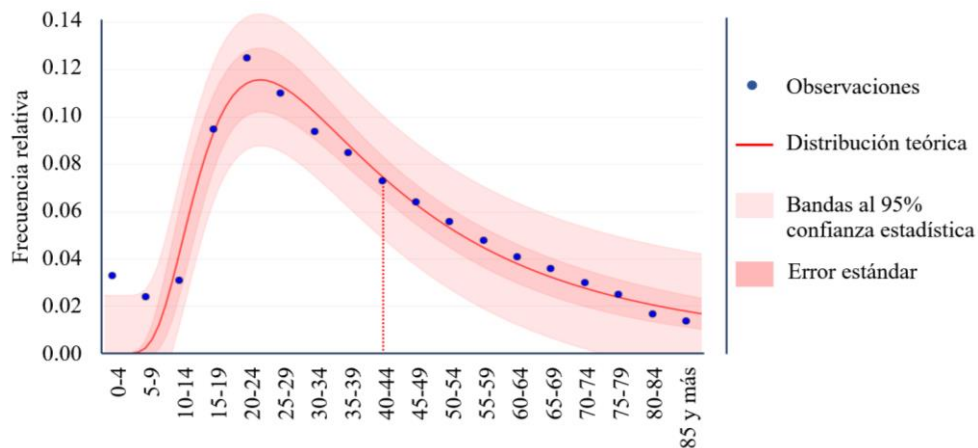
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

El modelo analítico de la distribución también permite inferir propiedades de invarianza, obtener probabilidades de transición, estimar intervalos de confianza estadística y establecer hipótesis sobre la significancia de las variaciones observadas. Por ejemplo, en la Figura 3.38 se modela la función de densidad $f_{D_\alpha}(\varepsilon, t)$ correspondiente al mismo periodo en grupos quinquenales de edad con la misma descripción de la Figura 3.37 y en ella se señala el parámetro de escala que refiere a la edad promedio de defunción. A partir de este valor genérico, es posible comparar los parámetros de los demás años con el fin de analizar la tendencia de las variaciones.

Como puede observarse en el gráfico, el parámetro de escala de esta distribución que modela las defunciones por ET a nivel nacional es 42 e indica que el 63.2% de las personas fallecerá antes de 42 años después del tiempo umbral, que como en este caso es 0, corresponde a la edad 42. Asimismo,

resulta relevante que la probabilidad de que los niños de entre 0 y 14 años fallezcan en un ET es similar a la estimada para los adultos entre 70 y 79 años, mientras que los jóvenes entre 20 y 24 años exhiben una probabilidad que representa 6 veces esta probabilidad, provocando que las personas entre 15 y 39 años acumulen el 50.9% de todas las defunciones por ET.

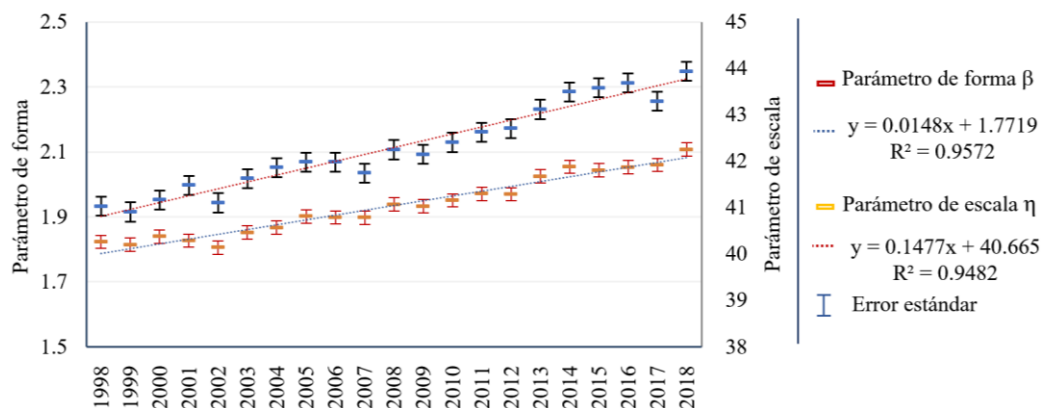
Figura 3.135. Ajuste paramétrico de la frecuencia de las defunciones por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Las variaciones paramétricas de la distribución a lo largo del tiempo pueden señalar aspectos relevantes sobre la evolución de un fenómeno, por ejemplo, para señalar si la edad de fallecimiento por ET se ha modificado y en qué dirección, o bien si el riesgo de fallecer aumenta con la edad. En la Figura 3.39 se muestra cómo ambos parámetros crecen con el tiempo en forma lineal, afirmación que se corrobora mediante los coeficientes de determinación de las rectas de regresión para la serie 1998-2018 en sus parámetros de forma β ($R=0.9572$, $p<0.001$) y de escala η ($R=0.9482$, $p<0.001$).

Figura 3.136. Evolución de los parámetros de estimación para la distribución de Weibull, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En el gráfico de los parámetros se observa que el parámetro de forma es mayor que 1 en todos los casos, lo que puede interpretarse como una tasa de defunciones creciente, mientras en 1998 el valor de $\beta=1.823$, en 2018 la estimación es $\beta= 2.11$, un aumento de 15.6%.

Por otro lado, el parámetro de escala en 1998 fue $\eta=41.03$, que indica la edad media de defunción por ET, dos décadas más tarde $\eta=43.93$, una variación de 7.1%, lo que supone una ganancia promedio de tres años de vida por persona fallecida en un ET, que al multiplicarse por las 15,704 defunciones observadas en 2018, equivale a 45,604 años de vida, la esperanza completa de vida para 618 personas recién nacidas en 1998, un concepto que, aunque parece abstracto, es absolutamente práctico para medir el tamaño de la pérdida social en términos productivos y de previsión social, lo que plantea la necesidad de nuevos indicadores y definiciones.

Definición 3.70. Una persona en edad α , en el tiempo t sobre el espacio ε , se denota por la variable $I_\alpha(\varepsilon, t)$, la cual solo toma dos valores: 1 si se encuentra viva y 0 en otro caso.

Definición 3.71. La variable aleatoria $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ representa la edad en que un recién nacido en el tiempo t , denotado por $I_0(\varepsilon, t)$, fallece debido a un ET en el mismo espacio ε y cumple dos hipótesis generales:

- iii. la realización de la variable aleatoria $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ es observable, y
- iv. puesto que $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ denota el tiempo que tarda un recién nacido en verse involucrado en un ET, entonces $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ es de naturaleza continua.

A partir de esta definición, es posible calcular la función de distribución de probabilidades de $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ denotada por $F_{\mathcal{A}_t}(\varepsilon; \alpha)$, o simplemente $F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)$, conforme lo siguiente:

$$F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) = P(\mathcal{A}_t \leq \alpha) \quad \forall \alpha \geq 0 \quad (3.49)$$

Que se interpreta como ‘la probabilidad de que la edad en la que una persona fallece en un ET sea menor o igual a α ’.

De este modo se pueden hacer declaraciones de naturaleza probabilística sobre la edad de participación de una persona en un ET en términos de una función $F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)$ y arreglar esta información en forma matricial para su uso sistematizado. Así, por ejemplo, la probabilidad de que un recién nacido muera en un ET entre las edades α y $\alpha + \tau$ ($\tau > 0$) por un ET, se escribe

$$\begin{aligned} P(\alpha < \mathcal{A}_t < \alpha + \tau) &= P(\mathcal{A}_t > \alpha) \cap P(\mathcal{A}_t < \alpha + \tau) \\ &= F_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \tau) - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) \end{aligned}$$

Como es de imaginarse, para hacer manejable esta información deberá ordenarse bajo criterios unívocos y precisos. Con esta finalidad se precisa construir una matriz denominada *Tabla de Defunciones por ET para seguimiento de Cohortes* (TD-ET-Cohorte), la cual es un arreglo que contiene los registros de los individuos que han participado en un ET y que representan a la población de la que provienen geográficamente en un intervalo de tiempo específico.

Tabla 3.4. Tabla de Defunciones por ET para seguimiento de Cohortes, 1984-2016

Año	Cohorte	Edad comparable																		
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
2016	2002																			
2015	2001																			
2014	2000																			
2013	1999																			
2012	1998	131	154	206	248	349														
2011	1997	136	180	211	263	378	404													
2010	1996	145	211	246	318	378	390	449												
2009	1995	171	188	276	356	362	402	407	435											
2008	1994	199	246	287	307	432	387	424	463	442										
2007	1993	154	228	311	363	393	406	466	384	466	420									
2006	1992	168	219	334	371	428	417	458	438	410	469	410								
2005	1991	147	254	285	386	423	429	454	496	364	422	411	400							
2004	1990	167	221	276	365	432	466	434	468	406	428	380	349							
2003	1989	150	201	259	357	352	427	491	402	438	434	377	394	369	389					
2002	1988	162	218	272	328	389	389	431	456	416	408	420	386	341	375	337				
2001	1987	163	209	256	322	376	425	409	432	460	427	399	414	397	392	346	336			
2000	1986	166	197	257	305	374	424	410	397	412	449	375	433	405	360	377	327	362		
1999	1985	156	166	285	299	351	389	441	416	414	467	453	382	391	343	380	312	358	302	
1998	1984	128	183	250	264	348	355	403	402	442	369	430	443	417	380	372	329	335	294	299

Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

La TD-ET está destinada a estimar las probabilidades de ocurrencia de un ET para cada grupo de edad, así como su evolución a partir de las siguientes definiciones.

Definición 3.72. La función de supervivencia a un ET a la edad α de la cohorte $\Pi_0(\varepsilon, t)$ se define como el complemento de la función $F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)$ tal que

$$\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\varepsilon, t; \alpha) = \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\varepsilon; \alpha) = \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha) = 1 - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) \quad \forall \alpha \geq 0 \quad (3.50)$$

Como $F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)$ refiere a la probabilidad de que un recién nacido en t , $I_0(\varepsilon, t)$, fallezca antes de alcanzar la edad α , entonces la estimación de esta probabilidad está dada por el número de defunciones por ET entre las edades $[0, \alpha]$ sobre todas las defunciones por ET registradas en su cohorte, es decir,

$$F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) = \frac{\alpha d_0(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} \quad (3.51)$$

De manera complementaria, $\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha) = P(\mathcal{A}_t > \alpha) \quad \forall \alpha \geq 0$ y se estima mediante

$$\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha) = 1 - \frac{\alpha d_0(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} = \frac{\omega^{-(\alpha+1)} d_{\alpha+1}(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} = \frac{\omega d_{\alpha+1}(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} \quad (3.52)$$

Como ${}_n \mathcal{D}_\alpha(\varepsilon, t + \alpha)$ es la VA que denota el número de personas del grupo $\Pi_\alpha(\varepsilon, t + \alpha)$, que pertenecen a la cohorte $\Pi_0(\varepsilon, t + \alpha)$ que fallecieron en un ET entre las edades α y $\alpha + n$, entonces ${}_n \mathcal{D}_\alpha(\varepsilon, t + \alpha)$ puede ser definida como

$${}_n\mathcal{D}_\alpha(\varepsilon, t) = \sum_{j=\alpha}^{\alpha+n} \mathcal{D}_j(\varepsilon, (t+j)) \quad (3.53)$$

Con esperanza

$$E[{}_n\mathcal{D}_\alpha(\varepsilon, t)] = {}_n\mathcal{d}_\alpha(\varepsilon, t) = \sum_{j=\alpha}^{\alpha+n} d_j(\varepsilon, (t+j)) \quad (3.54)$$

En donde

$$\mathcal{D}(\varepsilon, t) = \sum_{j=0}^{\omega} d_j(\varepsilon, (t+j)) = \sum_{j=0}^{\alpha} d_j(\varepsilon, (t+j)) + \sum_{j=\alpha+1}^{\omega} d_j(\varepsilon, (t+j)) \quad (3.55)$$

De este modo, la función de densidad para $I_{\alpha_j}(\varepsilon, t)$ viene dada por una función de Bernoulli con parámetros $(\omega\mathcal{d}_{\alpha+1}(\varepsilon, t)/\mathcal{D}(\varepsilon, t), \mathcal{D}(\varepsilon, t))$ tal que

$$P[I_{\alpha_j}(\varepsilon, t) = k] = \begin{cases} \frac{\alpha\mathcal{d}_0(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} & \text{para } k = 0 \\ \frac{\omega\mathcal{d}_{\alpha+1}(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} & \text{para } k = 1 \end{cases}$$

Y la esperanza de está dada por

$$E[I_{\alpha_j}(\varepsilon, t)] = 0 \cdot \frac{\alpha\mathcal{d}_0(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} + 1 \cdot \frac{\omega\mathcal{d}_{\alpha+1}(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} = \frac{\omega\mathcal{d}_{\alpha+1}(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} \quad (3.56)$$

De este modo, la información necesaria para realizar los cálculos de las entradas de la TER está contenida en el vector $(\mathcal{D}_{0_t}(\varepsilon), \mathcal{D}_{1_t}(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\omega_t}(\varepsilon))$, el cual sólo depende de los valores provenientes de las personas expuestas que han fallecido en un ET.

Otro aspecto de interés que se deduce del modelo es la relación de esta información con la obtención de probabilidades y esperanzas matemáticas. Los pasos entre los datos y la generación de las probabilidades son muy intuitivos, como puede verse a continuación.

Dado que $\Pi_t(\varepsilon)$ denota el total de la población y en las fuentes de información solo se encuentran las estimaciones demográficas, el valor obtenido es en realidad un valor aproximado del número de personas que fallecen en un ET de entre todas las expuestas al riesgo, es decir, la población en riesgo está dada por $\kappa \cdot \Omega_t(\varepsilon)$.

A la magnitud del escalar $\kappa \in \mathbb{R}^+$ que satisface la ecuación anterior se le denomina *valor de escalamiento* entre la fuente de información y la población expuesta y es, por supuesto, totalmente dependiente de la fuente seleccionada, por lo que es posible hallar a tantos estimadores de este valor como fuentes de información disponible para la delimitación espacio-temporal, por lo que no es único, sin embargo, la Ley de los grandes números hará posible la convergencia de los aspectos cualitativos del fenómeno.

Definición 3.73. El número de involucrados en un ET a la edad α de la cohorte $\Pi_0(\varepsilon, t)$ son todas las personas que a edad α en el tiempo $(t + \alpha)$ han participado en un ET, lo que se denota mediante $\mathbb{I}_\alpha(\varepsilon, t + \alpha)$.

Como puede verse, todas las personas que continúan con vida a edad α en el tiempo $(t + \alpha)$ también han sobrevivido a otros riesgos, por lo que la función marginal de supervivencia no toma en cuenta algunos componentes informativos sobre la participación de todas las personas en ET, para lo cual es posible generar una medida complementaria de supervivencia estimada a partir de las variables $\mathbb{I}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)$, $\mathcal{V}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)$ y $\mathcal{D}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)$ que mantienen la relación de la ecuación 3.56.

De este modo, la extensión del modelo ayuda a estimar el número de personas en edad α que estuvieron involucrados en un ET en el espacio ε y en el tiempo t , denotado por \mathbb{I}_{α_t} y que es una VA que a su vez se descompone en dos variables aleatorias y se expresa mediante

$$\mathbb{I}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon) = \mathcal{V}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon) + \mathcal{D}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon) \quad (3.57)$$

$\mathbb{I}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)$, entonces $\mathcal{V}_{\alpha_{t+\alpha}}(\varepsilon)$ indica el número de personas que permanecieron con vida en $(t + \alpha)$ después de suceder el evento, por lo que se tiene la igualdad

$$\mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon) = \mathcal{V}_{\alpha_t}(\varepsilon) + \mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (3.58)$$

Y se cumple que $\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \mathcal{V}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{D}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) \forall k$, por lo que su esperanza matemática está dada por

$$E[\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)] = \mathbb{i}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \mathcal{v}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{d}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) \quad (3.59)$$

O en su forma extendida para distinguir a los ilesos de los heridos $\mathcal{V}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \mathcal{U}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{H}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$

$$\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \mathcal{U}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{H}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{D}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) \quad (3.60)$$

cuya esperanza matemática está dada por

$$E[\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)] = \mathbb{i}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \mathcal{u}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{h}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{d}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) \quad (3.61)$$

En donde $\mathcal{v}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$ es el número de supervivientes al ET, que se compone de aquellos que salieron ilesos $\mathcal{u}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$, los heridos $\mathcal{h}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$ y los difuntos $\mathcal{d}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$ en edad α al tiempo $(t + k)$, por lo que

$$\mathbb{I}_t(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon) \quad (3.62)$$

Y su esperanza es

$$E[\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)] = \mathbb{i}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} E[\mathbb{I}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)] = \sum_{\alpha=0}^{\omega} \mathbb{i}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$$

Y dado que se cumplen las igualdades

$$\mathcal{v}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{d}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} [\mathcal{u}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + \mathcal{d}_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)] \quad (3.63)$$

$$u_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + h_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + d_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} [u_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + h_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) + d_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)]$$

Y que de acuerdo con la ecuación (3.6)

$$d_{t+k}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} d_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon)$$

Entonces:

$$v_{t+k}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} v_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon), u_{t+k}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} u_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon), h_{t+k}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} h_{\alpha_{t+k}}(\varepsilon) \quad (3.64)$$

Considere ahora un grupo de $\Pi_0(\varepsilon, t)$ recién nacidos en el tiempo t . Si el número de personas del grupo inicial que están vivas a la edad α es $\Pi_{\alpha}(\varepsilon, t + \alpha)$ y el número de personas de edad α involucradas alguna vez en un ET pertenecientes a la misma cohorte está dado por

$$\mathbb{I}_{\alpha}^T(\varepsilon, t + \alpha) = \sum_{j=0}^{\alpha} \mathbb{I}_j(\varepsilon, t + j) \quad (3.65)$$

Así, bajo el supuesto de independencia, la cantidad $\mathcal{V}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ sobre una población expuesta a las DT es una suma de $\Pi_{0_t}(\varepsilon)$ variables aleatorias de Bernoulli, denotada como $\mathcal{V}_{\alpha_t}(\varepsilon) \sim \text{Bin}(\mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon), \mathcal{S}_{\alpha_t}(\varepsilon))$, es decir,

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_{\alpha_t}(\varepsilon) &= \mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \mathcal{S}_{\alpha_t}(\varepsilon) \\ E[\mathcal{V}_{\alpha_t}(\varepsilon)] &= E[\mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon)] \cdot \mathcal{S}_{\alpha_t}(\varepsilon) = \mathbb{I}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \mathcal{S}_{\alpha_t}(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.66)$$

Ahora bien, como en el estudio de modelos a través del tiempo, siempre es relevante la tasa de cambio que afecta al fenómeno, la obtención de funciones analíticas simplifica y vuelve más eficientes las estimaciones paramétricas, al mismo tiempo que es posible estudiar las propiedades cualitativas al variar las condiciones iniciales del modelo.

En este sentido, la intensidad con que ocurren los diversos tipos de discordancias de tránsito es fundamental en el estudio de los ET y la dinámica que los rige, de ahí la importancia de la siguiente definición.

Definición 3.74. Para cada individuo en edad α , $I_{\alpha}(\varepsilon, t)$, existe una VA $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon) = \mathcal{J}_{\alpha}(\varepsilon, t)$ que denota el tiempo futuro de vida de esa persona. La esperanza matemática de $E[\mathcal{J}_{\alpha}(\varepsilon, t)] = \theta_{\alpha}(\varepsilon, t)$ es el tiempo esperado de supervivencia de $I_{\alpha}(\varepsilon, t)$ hasta que fallece por un ET.

Desde luego, no todas las personas de una cohorte participan en un ET, como solo la cantidad $\mathbb{I}_t(\varepsilon)$ se ve involucrada en un ET, únicamente para la proporción $\mathbb{I}(\varepsilon)/\Pi_0(\varepsilon, t)$ de personas existe la VA $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$, que es el mismo conjunto sobre el que operan las $\mathcal{J}_{\alpha}(\varepsilon, t) \forall \alpha \in (0, \omega)$, creando subconjuntos menores conforme crece α , ya que:

$$\mathcal{T}_\alpha(\varepsilon, t) = [\mathcal{A}_t(\varepsilon) - \alpha] \quad (3.67)$$

con lo que es posible determinar la distribución de $\mathcal{T}_\alpha(\varepsilon, t) = \mathcal{T}_\alpha(t)$ si se conoce la distribución de $\mathcal{A}_t(\varepsilon)$ y se trata del mismo espacio ε . También debe notarse que $\mathcal{T}_0(t) = \mathcal{A}_t(\varepsilon)$, por lo que

$$\begin{aligned} P(\mathcal{T}_{0_t}(\varepsilon) \leq \tau) &= P(\mathcal{A}_t(\varepsilon) \leq \tau) = F_{\mathcal{T}_0}(\varepsilon, t; \tau) = F_{\mathcal{A}_t}(\varepsilon, \tau) \\ &= \frac{{}_\tau d_0(\varepsilon, t)}{\mathcal{D}(\varepsilon, t)} \end{aligned}$$

De este modo, para cada individuo en edad α al tiempo t , existe una variable aleatoria $T_{\alpha_t}(\varepsilon)$ que denota el tiempo futuro de vida de esa persona, por lo que es posible obtener su esperanza. De esta forma, para cualquier vector dado por

$$\left(E[\mathcal{D}_{\alpha_{t_1}}(\varepsilon)], E[\mathcal{D}_{\alpha_{t_2}}(\varepsilon)], \dots, E[\mathcal{D}_{\alpha_{t_n}}(\varepsilon)] \right) = \left(d_{\alpha_{t_1}}(\varepsilon), d_{\alpha_{t_2}}(\varepsilon), \dots, d_{\alpha_{t_n}}(\varepsilon) \right) \quad (3.68)$$

existe la colección $\left(\mathcal{T}_{\alpha_{t_1}}(\varepsilon), \mathcal{T}_{\alpha_{t_2}}(\varepsilon), \dots, \mathcal{T}_{\alpha_{t_n}}(\varepsilon) \right)$ cuya esperanza matemática

$$\left(E[\mathcal{T}_{\alpha_{t_1}}(\varepsilon)], E[\mathcal{T}_{\alpha_{t_2}}(\varepsilon)], \dots, E[\mathcal{T}_{\alpha_{t_n}}(\varepsilon)] \right) = \left(\theta_{\alpha_{t_1}}(\varepsilon), \theta_{\alpha_{t_2}}(\varepsilon), \dots, \theta_{\alpha_{t_n}}(\varepsilon) \right) \quad (3.69)$$

es el vector de expectativas de vida de las personas localizadas en el espacio ε , en el tiempo t a la edad α , por lo que $E[\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)] = \theta_{\alpha_t}(\varepsilon)$ es el tiempo futuro que una persona en edad α podría vivir si su vida no fuera truncada por un ET, lo que la convierte en una estimación de la privación relativa que sufre un individuo al perder la vida en esa edad, lo que motiva nuevas definiciones.

Luego, la ley de distribución de probabilidades de $\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ es la función

$$F_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) = P(\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq s)$$

y el complemento de esta probabilidad es

$$\begin{aligned} P(\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) > s) &= 1 - P(\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq s) \\ 1 - F_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) &= S_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) \end{aligned} \quad (3.70)$$

Así, la probabilidad condicionada de que un recién nacido participe en un ET entre las edades x y x , dado que no ha estado involucrado en uno hasta su edad alcanzada x , viene dada por

$$\begin{aligned} F_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; \tau) &= {}_\tau q_{\alpha_t} = P(\alpha \leq \mathcal{T}_{\alpha_t} \leq \alpha + \tau | \mathcal{A}_t > \alpha) \\ &= \frac{P\left(\left(\alpha \leq \mathcal{T}_{\alpha_t} \leq x + t\right) \cap \left(\mathcal{A}_t > \alpha\right)\right)}{P(\mathcal{A}_t > \alpha)} \\ &= \frac{P\left(\left(\alpha \leq \mathcal{T}_{\alpha_t} \leq \alpha + \tau\right) \cap \left(\mathcal{T}_{\alpha_t} > 0\right)\right)}{P(\mathcal{A}_t > \alpha)} \\ &= \frac{P(\alpha \leq \mathcal{T}_{\alpha_t} \leq \alpha + \tau)}{P(\mathcal{A}_t > \alpha)} \\ &= \frac{F_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \tau) - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)}{1 - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \end{aligned} \quad (3.71)$$

De la ecuación anterior se desprende que

$${}_{\tau|u}q_{\alpha_t} = \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau) - \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau+u)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \quad (3.72)$$

En forma análoga se obtiene

$$\begin{aligned} {}_{\tau|u}q_{\alpha_t} &= \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau) - \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau+u)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \cdot \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau)} \\ &= \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau) - \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau+u)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau)} \cdot \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha+\tau)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} = {}_t p_{\alpha} \cdot {}_u q_{\alpha+t} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Como en general los registros de las edades de los involucrados en ET se realizan en años completos de edad alcanzada y es poco usual contar con más información en este sentido. Por lo anterior, es necesario ampliar al modelo para que tome en cuenta esta limitación y permita utilizar los resultados teóricos a partir de los datos reales.

El concepto de *esperanza de vida* se define como el tiempo futuro de vida que se espera viva una persona, usualmente medida en años, de mantenerse la tendencia de mortalidad de su cohorte (Haupt y Kane, 2003: 58), por lo que, a través de este indicador se logran sintetizar las probabilidades de mortalidad y supervivencia.

Mediante este indicador también es posible resumir la intensidad de las defunciones que registra una población desde el nacimiento o a lo largo de todas las edades. Como la mayoría de las mediciones utilizadas en este modelo, su estimación depende de los registros administrativos, los cuales le heredan su calidad y los niveles de desagregación posibles.

Definición 3.75. Para cada individuo en edad α , $I_{\alpha}(\varepsilon, t)$, existe una VA $[J]_{\alpha_t}(\varepsilon) = [J]_{\alpha}(\varepsilon, t)$ que denota el número de años de vida futura de esa persona. La esperanza matemática de $E([J]_{\alpha_t}(\varepsilon) = k) = [\theta]_{\alpha}(\varepsilon, t)$ es la cantidad de años de supervivencia de $I_{\alpha}(\varepsilon, t)$ hasta que fallece por un ET.

La VA recién definida puede determinarse a partir de $T(x)$ debido a que

$$P([J]_{\alpha_t}(\varepsilon) = k) = P(k \leq \mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq k+1) = {}_k|_1 q_{\alpha_t} \quad (3.74)$$

Es la probabilidad de que α_t participe en un ET en el k -ésimo año.

Como $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ es una VA continua se cumple que $P(\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon) = t) = P(\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon) = t+1) = 0$ luego, por extensión, la función de distribución de $\mathcal{K}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ puede ser obtenida a través de las siguientes expresiones

$$P([\mathcal{T}]_{\alpha_t}(\varepsilon) = k) = P(k \leq \mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq k + 1) = {}_t p_{\alpha} \cdot {}_1 q_{\alpha+k} \quad \forall k \quad (3.75)$$

La esperanza completa de vida de una persona en edad α puede estimarse a través de la variable $\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ con base en las probabilidades de cada grupo de edad α en el tiempo t a través del paso del tiempo s mediante la siguiente ecuación

$$E[\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)] = \int_0^{\infty} s \cdot F_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) ds \quad (3.76)$$

Que al aplicar un resultado de probabilidad ampliamente conocido se sigue

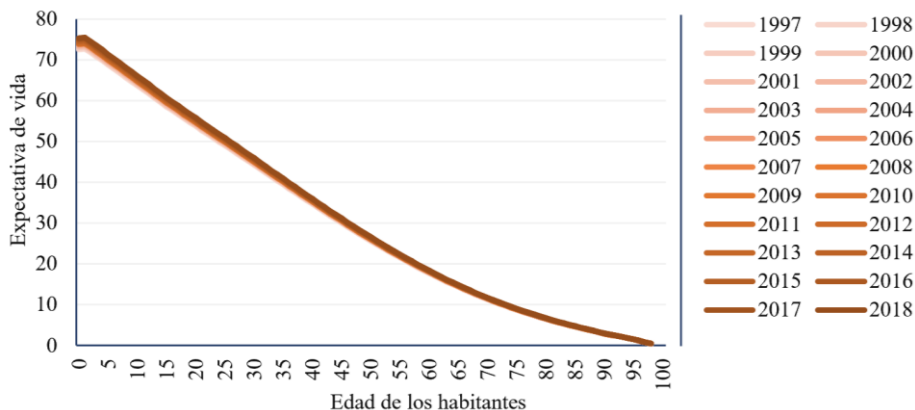
$$\begin{aligned} E[\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)] &= 0 + \int_0^{\infty} [1 - F_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s)] ds \\ &= \int_0^{\infty} S_{\mathcal{T}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) ds \end{aligned} \quad (3.77)$$

Es decir, la esperanza del tiempo futuro de una persona $I_{\alpha_j}(\varepsilon, t)$ en edad α que puede fallecer por todas las causas, incluidos los ET.

A menudo, la esperanza de vida es empleado como un indicador fuente del desarrollo humano porque se asocia con el bienestar, por ejemplo, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2020); lo emplea en sus indicadores con el fin de diseñar su índice de desarrollo humano.

Al igual que en otros aspectos, durante las últimas décadas, la mayoría de los países han experimentado un avance muy significativo en la esperanza de vida de las personas. Sin importar la edad de referencia, la expectativa de vivir unos años más se ha incrementado debido principalmente a los avances en materia de salud y control de enfermedades evitables.

Figura 3.137. Variación en la expectativa de vida a través de los años, 1998-2018

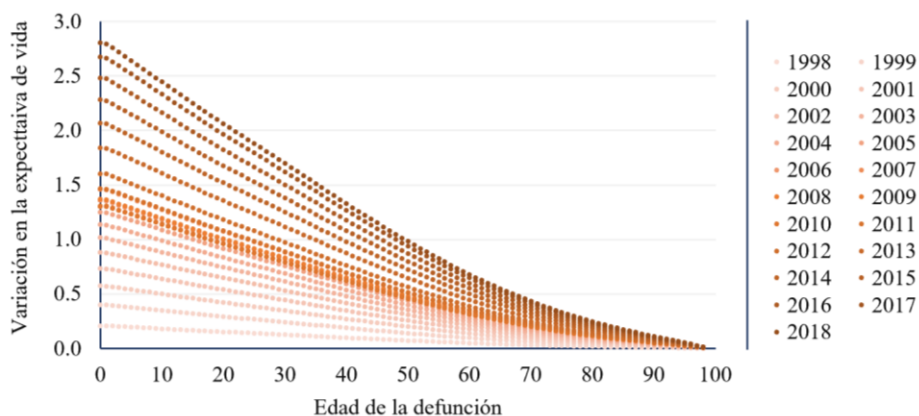


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En México, este avance se refleja en que los recién nacidos en 1990 tenían una esperanza de vida de 70.42 años —67.02 en el caso de los hombres y 73.99 en el caso de las mujeres—, y que en 2020 las estimaciones lleven a 75.73, —con 73.29 para los hombres y 78.28 para las mujeres—, lo que se traduce en un aumento promedio de 5.31 años que representa 7.5% de vida adicional a la esperada hace 30 años, —9.3% y 5.8% para hombres y mujeres, respectivamente.

Desde luego, la ganancia de tiempo futuro de vida no se da de manera homogénea en todas las edades, dado que la distribución de riesgos es diferencial, también el cambio de las probabilidades de supervivencia lo son, por lo que hay algunas edades en las que la ganancia es mayor que en otras. En la Figura 3.41 se muestran las ganancias en el tiempo de vida futura para cada edad a través de los años, como puede verse, el aumento para un recién nacido es de 2.6 años, lo que representa 3.6% - 2.98 años para los hombres y 2.19 para las mujeres, o 4.3% y 2.9%, respectivamente—.

Figura 3.138. Variación en la expectativa de vida a través de los años, 1998-2018

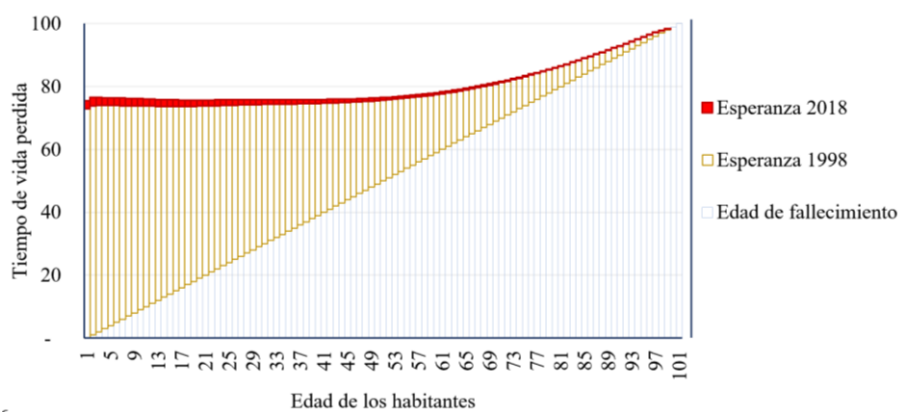


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De este modo, la variación en la esperanza de vida condicional al grupo de edad entre 1998 versus 2018 implica la posibilidad de estimar la ganancia individual de cada persona que sobrevive a un ET con base en su edad, grupo poblacional y cohorte de pertenencia. En este sentido, pueden resultar intuitiva la afirmación de que, potencialmente, no ha perdido el mismo tiempo futuro de vida una persona que fallece a la edad 30 en el siglo pasado que una persona en la misma edad en este año.

Si se acepta esta hipótesis cuantitativa, esta medida se amplifica para los recién nacidos y debe considerarse en las estimaciones asociadas a la pérdida potencial de las generaciones, ya que estos argumentos son similares a las hipótesis sobre la inclusión o exclusión de diversas causas de defunción con el fin de observar las variaciones en la población ante diversos escenarios de mortalidad.

Figura 3.139. Esperanza de vida condicional al grupo de edad, 1998 vs 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Una vez establecidas las características para los años completos alcanzados por una persona, después de verse involucrada en un ET, surge otra cuestión: como es evidente que no todos los grupos de edad se exponen de la misma manera, ni participan con la misma frecuencia en ET. Además, se sabe que algunas edades son predominantes en las defunciones y algunas en los heridos, así que podría ser de interés conocer ¿cuál es la intensidad con la que los diferentes grupos participan en los ET? Más aún, ¿cómo caracterizar este comportamiento de manera generalizada? Para dar respuesta a estas interrogantes, se requieren ecuaciones dinámicas que permitan analizar las variaciones respecto a la edad y a través del tiempo.

3.4 Tiempo de vida perdido

Las sociedades presentan niveles de mortalidad por causas evitables de manera inversamente proporcional a los esfuerzos en gestionar los riesgos que amenazan a cada uno de sus miembros. Una medida de la modernidad de un sistema social puede basarse en la calidad de vida de los individuos que la conforman. Desde luego, la preservación de la vida de un ser humano constituye el núcleo del contrato social entre el Estado y sus habitantes, así como el ejercicio de las garantías de una vida con las mejores condiciones de salud y bienestar posibles, en donde la confianza en sus instituciones constituye la fuerza de gravedad entre los habitantes y el sistema de gobierno (De Sousa Santos, B., 2004).

A pesar de los múltiples intentos en la historia humana y los usos operativos de las estimaciones con fines administrativos o legales, es imposible estimar o asignar un valor a la vida, ya que la privación de la vida se constituye en un atentado no solo contra el ser humano en su individualidad, sino contra toda la humanidad. De la misma manera que el momento de fallecimiento de una persona es incierto, lo es también el tiempo de su supervivencia, sus posibilidades de desarrollo o los potenciales aportes

en cualquiera de los ámbitos de la sociedad, no obstante, la pérdida existe y permanece más allá de lo observable, al final, para un individuo, se trata de ‘todo o nada’.

Desde luego, ante la pérdida de vidas humanas, es posible estimar algunas medidas que den cuenta del potencial de la privación, sobre todo si la interrupción se debe a la materialización de un riesgo que se configura como una causa evitable, tal como ocurre con los eventos producidos por discordancias de tránsito.

Definición 3.76. A la distribución condicional de \mathcal{A}_t , dada que ha sobrevivido a la edad α en el tiempo $(\alpha + t)$, es denotada por la función $\mu_{\alpha_t}(\varepsilon; \tau)$ y se le conoce como *fuerza de mortalidad* porque expresa la tasa de defunción de la población por un ET a cierta edad α , en el tiempo t y sobre el espacio ε , obtenida bajo el supuesto sobre su comportamiento en el intervalo $[t, t + 1)$.

Con esta definición y considerando que

$${}_{\tau}q_{\alpha_t} = P(\alpha \leq \mathcal{J}_{\alpha_t} \leq \alpha + \tau | \mathcal{A}_t > \alpha)$$

suponga que $\tau = \Delta\alpha$, ahora bien, si

$$\begin{aligned} \Delta\alpha q_{\alpha_t} &= P(\alpha \leq \mathcal{J}_{\alpha_t} \leq \alpha + \tau | \mathcal{A}_t > \alpha) \\ &= \frac{F_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \Delta\alpha) - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)}{1 - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \end{aligned} \quad (3.78)$$

Por el teorema del valor medio del cálculo diferencial²⁸ y haciendo

$$y_0 = \alpha, y = \alpha + \Delta\alpha, g = F, g' = f$$

Resulta que

$$\begin{aligned} F_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \Delta\alpha) &\approx F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) + f_{\mathcal{A}_t}(\alpha)\Delta\alpha \\ F_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \Delta\alpha) - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha) &\approx f_{\mathcal{A}_t}(\alpha)\Delta\alpha \\ \Delta\alpha q_{\alpha_t} &\approx \frac{f_{\mathcal{A}_t}(\alpha)\Delta\alpha}{1 - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \end{aligned} \quad (3.79)$$

A la cantidad $\frac{f_{\mathcal{A}_t}(\alpha)\Delta\alpha}{1 - F_{\mathcal{A}_t}(\alpha)}$ se le denota $\mu_{\alpha_t}(\varepsilon; \tau)$ y es la fuerza con la que la población en edad α al tiempo t fallece por un ET.

Así, la relación entre la intensidad con la que la población participa en ET y las probabilidades de que una persona de edad α participe en un ET en un lapso de n años viene dado por

$$\mu_{0_t}(\varepsilon; \tau) = \frac{\mathcal{S}'_{\mathcal{A}_t}(\tau)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\tau)} = -\frac{d}{d\tau} \ln[\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\tau)]$$

²⁸ Para consultar la demostración de este teorema puede consultarse la excelente obra de Hassler *Mathematical Analysis*.

$$\begin{aligned}
-\int_x^{x+n} \mu_{0_t}(\varepsilon; \tau) d\tau &= \int_x^{x+n} d[\ln[\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\tau)]] \\
&= \ln[\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\tau)] \Big|_{\alpha}^{\alpha+n} = \ln[\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha + \tau) - \mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)] \\
&= \ln \left[\frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha + n)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \right] \\
&= \ln({}_n p_{\alpha})
\end{aligned} \tag{3.80}$$

Por lo que la estimación de las probabilidades de que un individuo de edad α no participe en un ET durante los siguientes n años se encuentra dada por

$${}_n p_{\alpha} = \exp^{-\int_{\alpha}^{\alpha+n} \mu_{0_t}(\varepsilon; \tau) d\tau} \tag{3.81}$$

A partir de esta ecuación se puede obtener la probabilidad de participar en un ET en términos de la fuerza de mortalidad.

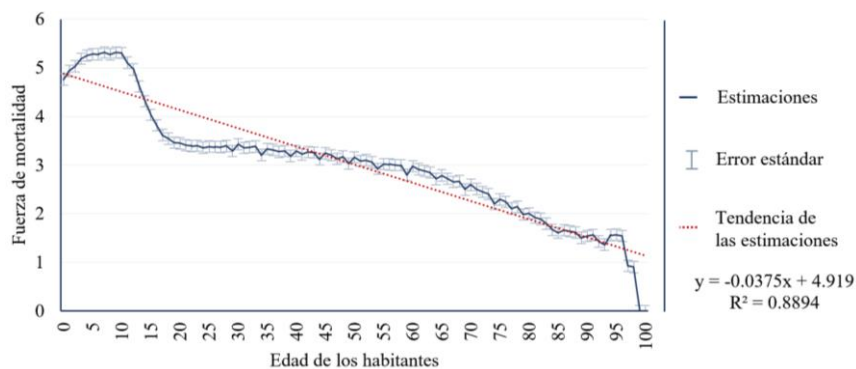
$$\begin{aligned}
f_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; \tau) &= F'_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; \tau) \\
s q_{\alpha} &= \frac{d}{dt}(1 - s p_{\alpha}) = \frac{d}{ds} \left(1 - \frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha + s)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \right) \\
&= \frac{\mathcal{S}'_{\mathcal{A}_t}(\alpha + s)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha + s)} \left(\frac{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha + s)}{\mathcal{S}_{\mathcal{A}_t}(\alpha)} \right) \\
&= \mu_{0_t}(\varepsilon; s) \cdot s p_x
\end{aligned}$$

Por lo tanto

$$F_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; \tau) = \int_0^{\tau} \mu_{0_t}(\varepsilon; s) \cdot s p_x \tag{3.82}$$

Las fuerzas de mortalidad definen la forma en que evoluciona una población y también ayudan a encontrar las diferencias entre grupos poblacionales, cohortes y periodos de tiempo con elementos asociados a las transiciones demográficas. En la Figura 3.43 se observa la fuerza de mortalidad por ET a nivel nacional y su evolución a través de la edad. Como puede verse, las fuerzas con las que operan muestran una tendencia hacia cero, a partir de los 10 años, mostrando cómo los mexicanos poseen una mayor intensidad de defunciones en su etapa más productiva.

Figura 3.140. Fuerza de mortalidad de los ET por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Un parámetro complementario que deriva de la fuerza de mortalidad es el tiempo de vida que aún esperaba vivir un persona que a cierta edad α fallece a causa de un ET, para lo cual ya se han establecido las estimaciones mediante ecuaciones basadas en probabilidades de supervivencia y muerte referidas a la población a la que pertenece.

Con el fin de estimar cuantitativamente el tamaño de la pérdida de tiempo de vida que las personas pudieron haber gozado y la acumulación que una sociedad puede llegar a perder, se ha desarrollado un indicador que se basa en las estimaciones de probabilidades de supervivencia y muerte.

Definición 3.77. El *Bono de tiempo de vida perdida* al tiempo t es una medida de la pérdida que experimenta la sociedad, localizada en un territorio y tiempo específicos, debido a la existencia de discordancias de tránsito. Para su integración se consideran dos fuentes de incertidumbre: la fuerza de mortalidad de la cohorte y la intensidad de la pérdida futura, lo que se observa en la siguiente ecuación:

$$\mathcal{B}_{\theta_{\alpha_t}}(\varepsilon) \frac{\int_0^{\infty} s \cdot F_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) ds}{\alpha_t} = \frac{E[\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)]}{\alpha_t} \quad (3.83)$$

Desde luego, la distribución de $\mathcal{B}_{\theta_{\alpha_t}}(\varepsilon)$ es dinámica y cambia a través del tiempo y su análisis permite valores la dimensión de las defunciones en relación con otros fenómenos, sobre todo al comparar múltiples causas. Cabe señalar que la métrica no es un ejercicio de valoración de la vida, sino una cuantificación del tiempo que cada persona ha perdido potencialmente al haberse interrumpido su vida por un evento contingente, considerando su pertenencia a un grupo social demarcado por un espacio y tiempo específicos, así como por su edad al momento de fallecimiento. La idea sociológica subyacente es que este monto es algo que podría haber sido aprovechado por la sociedad si se hubiera prevenido y conservado la vida.

En este punto debe resaltarse que la estimación de la pérdida de tiempo de vida se realiza sobre la hipótesis general de que existe una tabla de mortalidad para la experiencia mexicana y que la población se asemeja de igual manera en todo el país y que su comportamiento es más o menos homogéneo. La forma de abordar esta situación es similar a otros casos que involucran la dinámica poblacional, ya que, como se ha señalado previamente, es el CONAPO quien calcula oficialmente la esperanza de vida y, dados los diversos desafíos inmersos en su cálculo a escalas desagregadas, incluso a nivel municipal, pues, como señala Israel Paredes et al. (2017): ‘aún con el avance de los equipos y los programas de cómputo más potentes, implica un alto costo en términos del manejo estadístico de información, tanto por el volumen como por el empleo de datos censales y registros administrativos de defunciones’.

No obstante, a partir de estas cifras y aceptando esta hipótesis de trabajo, es posible estimar el número esperado de años acumulados que se espera que vivan todas aquellas personas situadas entre las edades $[\alpha, \alpha + n)$, dada su cohorte inicial de $\pi_0(\varepsilon, \alpha - t)$ individuos, mediante:

$$TVP_{\alpha} = \int_0^n t \cdot \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s) \cdot \mu_{\alpha_t}(\varepsilon; s) ds + n \cdot \pi_{\alpha+n_{t+n}}(\varepsilon)$$

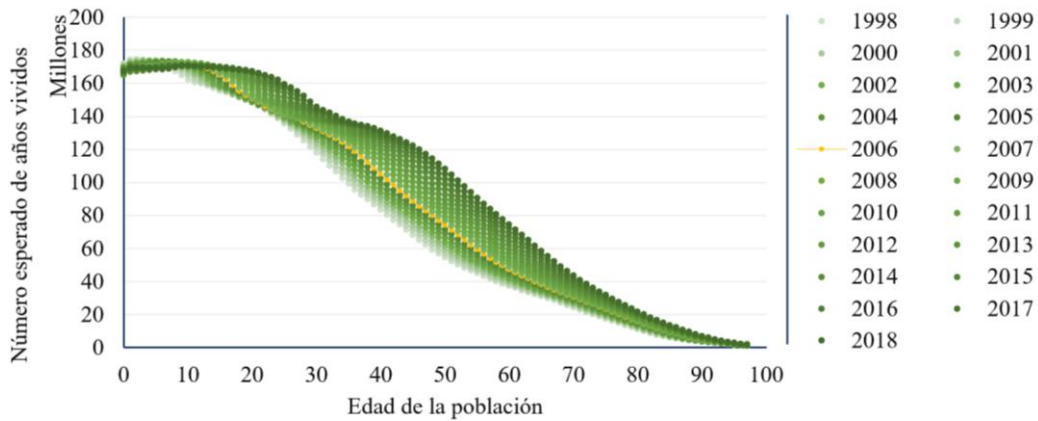
Ecuación que, al integrar por partes, resulta

$$\begin{aligned} TVP_{\alpha} &= \left(-t \cdot \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s)\right)\Big|_0^n + \int_0^n \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s) ds + n \cdot \pi_{\alpha+n_{t+n}}(\varepsilon) \\ &= \int_0^n \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s) ds + n \cdot \pi_{\alpha+n_{t+n}}(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.84)$$

De este modo, la acumulación de años que una sociedad puede esperar que viva una población en un año dado depende de varios factores. Un primer impulso está dado por la supervivencia de sus recién nacidos y su esperanza completa de vida; una vez afrontado este reto, se poseen bajas probabilidades de fallecer, por lo que la ‘bolsa de tiempo de vida’ permanece relativamente estable. Sin embargo, con el paso de la edad, se va haciendo cada vez más pequeña.

Ahora bien, lo que ha ocurrido en la expectativa de vida con el paso del tiempo es que se ha ido ganando en casi todos los años, excepto en las primeras edades, debido al menor número de nacimientos, aunque esta disminución es solo en términos absolutos ya que diversas estimaciones se ven profundamente afectadas, por ejemplo, todas las relacionadas con la productividad, los fondo de pensiones y con la previsión social sostenida de forma intergeneracional.

Figura 3.2. Evolución de los años de vida perdida a través de los años, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

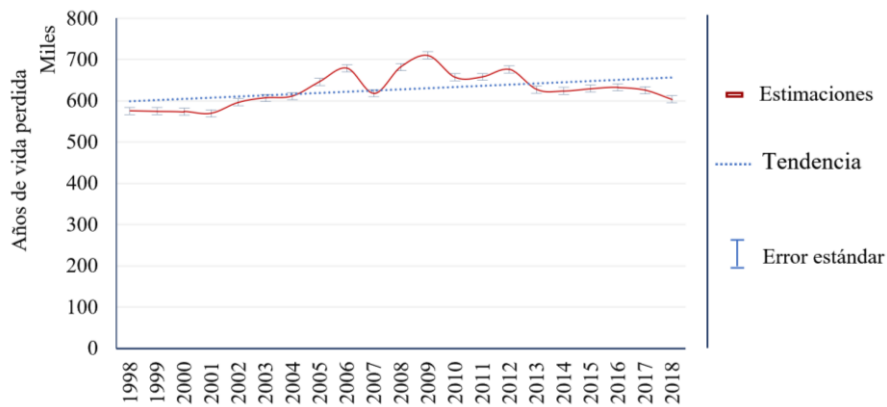
Definición 3.78. La *Privación Potencial de Vida por Eventos de Tránsito* a la edad α en el año t y el espacio ε , es el resultado de la agregación de todos los tiempos de vida futura de las personas fallecidas en ese tiempo y espacio definidos, independientemente de su edad, lo que se expresa mediante la siguiente ecuación

$$PPV_t^{ET}(\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^{\omega} d_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot E[\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)] = \sum_{\alpha=0}^{\omega} d_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \int_0^{\infty} S_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) ds \quad (3.85)$$

La ecuación 3.85 es una medida de la pérdida que experimenta la sociedad, localizada en un territorio y tiempo específicos, debido a la existencia de discordancias viales. Para su integración se consideran dos fuentes de incertidumbre: la incidencia de los ET y la severidad de la pérdida.

En la Figura 3.45 se observa la evolución de la PPV_t^{ET} en México, la cual muestra una tendencia creciente con más de 600 mil horas todos los años y que en 2009 supera las 700 mil, impulsada en gran parte por la distorsión del periodo 2007-2011 y que, en 2018, es equivalente a la privación potencial de la vida motivada por la suma de todas las defunciones registradas en Aguascalientes, Quintana Roo, Campeche, Colima y Baja California Sur si se consideran todas las causas.

Figura 3.3. Años de vida perdida a través de los años, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para estimar las tendencias de cambio de toda la población es a través de la tasa central de mortalidad, una forma de estimarla es mediante la intensidad promedio de defunciones, en la cual la población va falleciendo conforme van ocurriendo las defunciones y se calcula mediante

$${}_n m_\alpha = \frac{\int_0^n \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s) \cdot \mu_{\alpha_t}(\varepsilon; s) ds}{\int_0^n s \cdot \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; s) ds} = \frac{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon) - \pi_{\alpha+n_t+n}(\varepsilon)}{n T_\alpha} \quad (3.86)$$

Que es aproximadamente igual a la fuerza promedio de mortalidad, promediada por el periodo de tiempo.

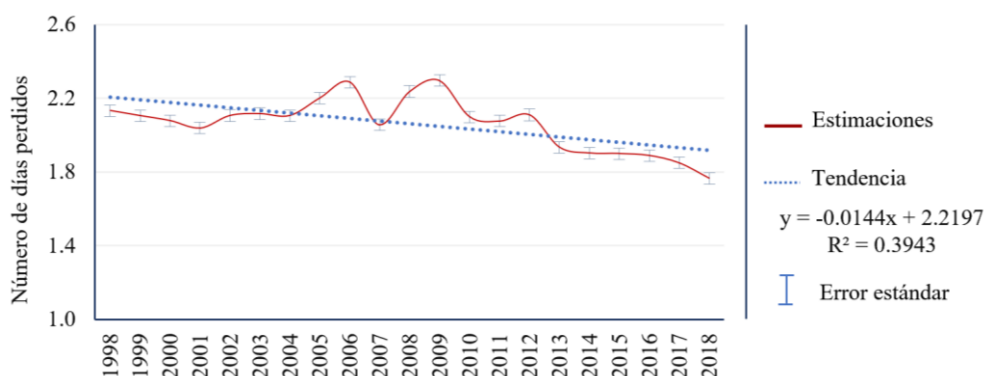
Si en la ecuación 3.86 se incluye la fuerza de mortalidad por ET, se obtiene la tasa promedio de defunciones por ET. De este modo, la población vulnerable identificada por el vector de factores asociados $\vec{FA} \pi_{\alpha_t}(\varepsilon; \vec{FA})$ perderá $\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ vidas en edad α en el año t , como la privación del tiempo de vida de cada persona fallecida en edad α está dada por $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, el $PPV_t^{ET}(\varepsilon)$ promedio de las personas en edad α , ocurridas en el año t está dado por

$$\overline{PPV_t^{ET}(\varepsilon)} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{\omega} \mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \theta_\alpha(\varepsilon, t)}{\pi_{\alpha_t}} \quad (3.87)$$

Para interpretar de mejor manera la cantidad dada por la PPV_t^{ET} existen varias transformaciones posibles que son bastante útiles. Por ejemplo, si se desea conocer el impacto en la población general, esto podría relacionarse con el tamaño de población, lo que asemeja a la pérdida *per cápita* y podría expresarse en número de días.

En este sentido, la Figura 3.46 muestra que, en 1998, la privación potencial de vida por ET es equivalente a que cada persona perdiera en ese año 2.11 días; en 2018 el valor es de 1.77, lo que señala una reducción de 17.23%. Desde luego, más allá de la interpretación que se acaba de hacer de esta medida relativa, su utilidad principal reside en la posibilidad de acotar el rango de edad y diseñar estimaciones financieras o de horas laborales que permitan valorar y comparar escenarios en forma estable.

Figura 3.4. Número anual de días perdidos *per cápita*, 1998-2018



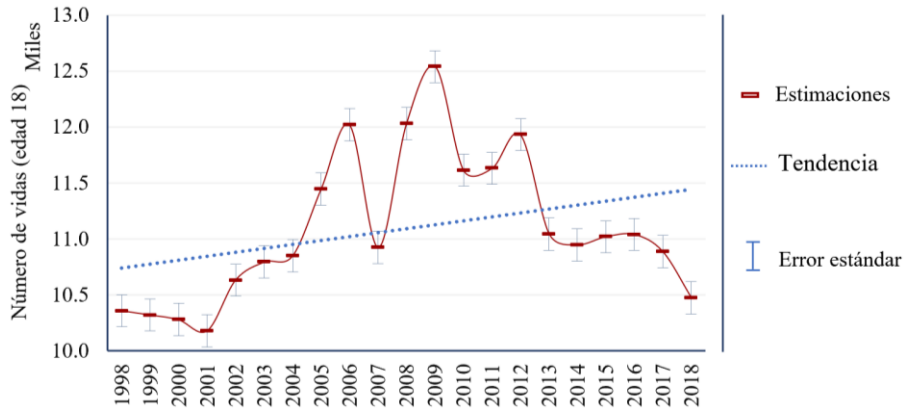
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otra forma de utilizar la PPV_t^{ET} es para estimar el número de vidas completas equivalentes. Por ejemplo, si la fuerza laboral del país está representada por las personas mayores de edad, el valor anual de PPV_t^{ET} puede convertirse a esta escala de medida mediante la expectativa de vida futura de las personas en edad 18 para cada cohorte, lo que equivale a resolver la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum_{\alpha=0}^{\omega} d_{\alpha_t}(\varepsilon) \cdot \int_0^{\infty} S_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(\varepsilon; s) ds}{E[\mathcal{J}_{18_t}(\varepsilon)]} \quad (3.88)$$

En la Figura 3.47 se muestra el resultado de estimar la ecuación (3.88) para el periodo 1998-2018. Para sintetizar la información, la línea roja muestra la evolución del PPV en su equivalencia en número de vidas perdidas a edad 18. La línea de estimaciones muestra cómo en los primeros años la cifra oscila entre 10 mil y 10,500 personas, no obstante, en el periodo 2006-2012 se incrementa hasta alcanzar a las 12,500 personas de edad 18, una cifra equivalente a todos los muertos en el país de entre 12 y 18 años por todas las causas.

Figura 3.5. Equivalencia del número de vidas de 18 años potencialmente perdidas, 1998-2018

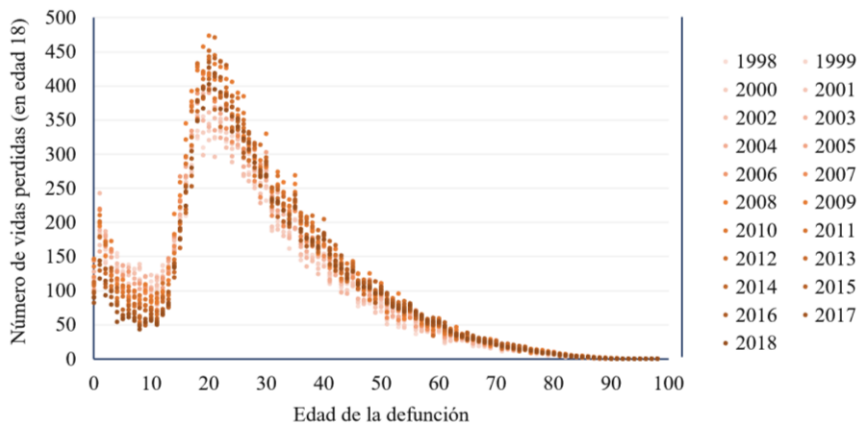


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para hacer manejable la información relacionada con todas las edades y todos los años, es necesario ordenarla bajo criterios matriciales unívocos y precisos. Con esta finalidad se propone la construcción de una matriz denominada *Tabla de Exposición al Riesgo* (TER), la cual es un arreglo que contiene los registros de los individuos que han fallecido en un ET y que representan a la población de la que provienen geográficamente en un intervalo de tiempo específico. La TER estima las probabilidades de fallecimiento de un ET para cada grupo de edad, así como su evolución. De este modo, la información necesaria para realizar los cálculos de las entradas de la TER está contenida en el vector $(\mathcal{D}_{0t}(\varepsilon), \mathcal{D}_{1t}(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\omega-1t}(\varepsilon))$, el cual sólo depende de los valores provenientes de las personas expuestas que han fallecido en un ET.

En la Figura 3.48 se muestra el resultado de desagregar las estimaciones dadas por la ecuación 3.88 para el periodo 1998-2018, lo que traduce el PPV de cada edad a una única edad 18.

Figura 3.6. Número de vidas equivalentes a 18 años potencialmente perdidas, 1998-2018

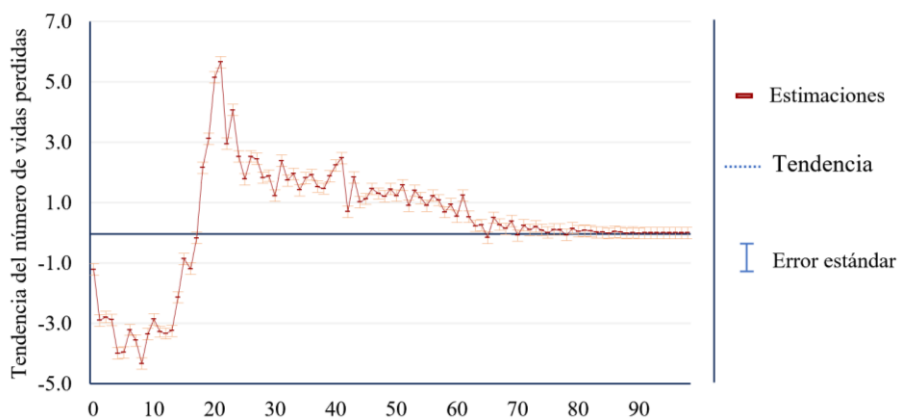


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Mediante el procedimiento descrito, en la figura se muestran los resultados de realizar una transformación para que la pérdida potencial de vida registrada en cada edad se refleje como una PPV en edad 18 mediante la equivalencia de la esperanzas de vida futura de cada cohorte. Como puede verse, las estimaciones se agrupan alrededor de una curva tipo Weibull en la que los menores de 1 año decrecen con el paso del tiempo, pero en el que las mediciones más recientes comienzan a dominar a partir de los 20 años.

Para extraer la información dada por las variaciones en la Figura 3.48, se han realizado las estimaciones de las pendientes de las rectas de regresión vertical de la familia de distribuciones —que refiere a los cambios observados en la PPV transformada a edad 18 para la misma edad a través del tiempo—. En la Figura 3.49 se muestran los coeficientes de la pendiente, el resultado señala que la tendencia de los menores de 18 años es negativa —aunque comienza a reducir su magnitud a partir de la edad 14 y es prácticamente cero para la edad 1—; después, entre el periodo de edad 18-40 crece y se mantiene positiva y superior a 1, para posteriormente comenzar a reducir su magnitud, tendiendo y oscilando alrededor del cero, hasta llegar a un valor estadísticamente nulo a partir de la edad 65, en donde se observa el primer cruce hacia un valor negativo.

Figura 3.7. Tendencia del número de vidas potencialmente perdidas equivalentes a personas de 18 años



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Las reflexiones sobre las principales justificaciones para postular leyes analíticas pueden coincidir en que, una gran variedad de fenómenos, pueden ser estudiados a través de modelos parsimoniosos y generales; además, del hecho de que una función con pocos parámetros es muy práctica y fácil de comunicar y calibrar a partir de muestras.

De la ecuación 3.86 se desprende una gran cantidad de información sumamente valiosa, no obstante, la posibilidad de distinguir entre las dos fuerzas que modulan la dinámica evolutiva es sin duda la de mayor alcance y que resuelve una de las fuentes de error más comunes en la investigación médica y

aún entre los especialistas dedicados a la estimación prospectiva: la distinción entre las propiedades de las fuerzas de mortalidad y la intensidad del riesgo, lo que permite distinguir entre poblaciones y cohortes mediante el uso analítico y paramétrico de las funciones $m'_{\alpha_t}(\varepsilon)$, $\mu_{\alpha_{(t+n)}}(\varepsilon)$ y $\mu_{(\alpha+t)_n}(\varepsilon)$.

Capítulo 4

Riesgos competitivos y tipos de efecto

¡Hay tantos más muertos que vivos!

Milan Kundera. *La inmortalidad* (1988)

Todo es simple y ordenado, excepto, por supuesto, el mundo.

Leo Kadanoff. *Simple Lessons from Complexity* (1999)

En el capítulo anterior se desarrollaron las ecuaciones que sustentan el modelo sobre el tiempo que transcurre, desde que un individuo es expuesto a alguno de los diferentes riesgos latentes, hasta el registro de la ocurrencia de un ET —el fenómeno observable que es producto de las discordancias de tránsito—, el cual desencadena consecuencias que pueden pasar inadvertidas, convertirse en daños materiales, producir heridos con distinto nivel de gravedad y, en el caso más severo, generar una o varias defunciones.

Desde el inicio del Decenio de acción para la seguridad vial, el énfasis de las autoridades y múltiples sectores en mejorar la inseguridad de los sistemas de transporte ha impulsado el abordaje de distintos desafíos relacionados con la disminución de las externalidades negativas producidas por el aumento de la intensidad y multiplicidad del transporte, así como por controlar las variaciones potenciales en la frecuencia, intensidad y severidad de las discordancias motivadas por la falta de coordinación entre los usuarios de la vía, aumentando el número de ET y el riesgo de incrementar el número de defunciones y discapacidades permanentes.

Como se ha visto, el riesgo no solo está determinado por la frecuencia de los eventos —los peligros—, sino también por su severidad y letalidad, ambas dependientes de la intensidad de la exposición y la vulnerabilidad de los vehículos y las personas ante estos peligros. Por lo tanto, las estrategias y prácticas más efectivas para adaptar y gestionar el riesgo de las DT también dependen de una mayor y mejor comprensión de las causas de los diferentes tipos de ET, así como de una evaluación adecuada de las estructuras funcionales y las interdependencias existentes entre dichas causas.

Dado que la exposición y la vulnerabilidad son específicas para un contexto dado, en este capítulo se modelan los procesos latentes de riesgo con base en su naturaleza y tipología con el fin de detallar de mejor manera los determinantes de los riesgos subyacente a los ET. Así, en la primera sección se establecen discusiones conceptuales sobre la inseguridad y los procesos latentes, así como diversos enfoques y planteamientos metodológicos para identificar y evaluar distintos tipos de riesgo de tránsito. A partir de este análisis se revisan las estrategias y posibilidades actuales para explorar las dimensiones de exposición y vulnerabilidad en contextos específicos, considerando los sistemas de registro, la adaptación dinámica y el rol de la percepción de la inseguridad y el riesgo como elementos subjetivos centrales de la realidad observable, comenzando con las definiciones de los denominados *determinantes del riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad*.

Una vez establecidas las nuevas definiciones, en la segunda sección se expanden las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 3 con el fin de ampliar el marco de análisis e incluir distribuciones multivariadas que permitan la concurrencia de múltiples riesgos. Así, para estudiar la latencia de los riesgos asociados a las discordancias de tránsito y analizar la exposición de cada grupo poblacional,

se plantea una analogía ecológica basada en el concepto de *riesgos competidores* para modelar a las diversas fuerzas y tipos de ET que producen defunciones como producto de las DT, lo que articula y completa el conjunto de modelos enfocados en estimar las expectativas de vida y las probabilidades de supervivencia y defunción, lo que se extiende para distintos grupos poblacionales y etarios sobre conjuntos de usuarios con características compartidas que pueden ser asociados con categorías naturales, sociales o con base en atributos artificiales que puedan ser de interés para los diseñadores de políticas públicas.

Una vez completados los modelos de análisis, se analizan distintos conjuntos de datos longitudinales y transversales que caracterizan poblaciones, lo que se realiza con el fin de distinguir entre los tipos de efecto asociados con las estructuras de las defunciones por ET en una población dada, en particular, para distinguir los efectos producidos por la *edad* de los involucrados, del *periodo* de estudio o de la *cohort* a la que pertenecen. En esta penúltima sección, se modelan y comparan datos específicos de la edad que hayan sido registrados en diferentes momentos y que correspondan con diferentes cohortes, para lo cual se emplean distintas aproximaciones prácticas que permiten reconocer los efectos de la Edad, el Período o la Cohorte, así como la interacción de distintos factores sociales, históricos y ambientales que podrían haber afectado simultáneamente a individuos y poblaciones de individuos, con el fin de reconocer potenciales acciones y estrategias implementadas en ciertos periodos que pudieran haber ayudado a hacer frente a los desafíos relacionados con los ET.

4.1 Determinantes del riesgo

En todas las categorías y grupos de población, la consecuencia de un ET se asocia con la probabilidad de que ocurra un cierto grado de lesión o una fatalidad, dado que una persona se ha visto involucrada en un evento, lo que aparentemente se magnifica conforme aumentan los niveles de exposición. Por supuesto, la ampliación de este tipo de mediciones a análisis multivariados implica diversas ventajas y desafíos, no solo porque permite precisar las estimaciones y diseñar y gestionar metas más claras y objetivas, sino porque permite acotar la variabilidad de las interpretaciones sobre ciertos ‘fenómenos observados’ e identificar factores y relaciones cruciales para explicar el fenómeno en forma adecuada.

Como se ha visto, al multiplicar la exposición de las personas por el riesgo de estar involucrado en un ET, se genera un proceso de conteo, es decir, una colección $\{ET_i(\varepsilon, \tau)\} = ET_1(\varepsilon, \tau), \dots, ET_k(\varepsilon, \tau), \dots, ET_n(\varepsilon, \tau)$ con $i = \overline{1, \dots, n}$, que alimenta el proceso $\mathcal{N}_\tau(\varepsilon)$, el cual se compone de la exposición de los involucrados y sus medidas de riesgo individuales generadas por su edad, la cohorte a la que pertenecen y muchos otros factores asociados (FA) al suceso, los que a su vez se encuentran condicionados por las posibilidades del binomio (ε, τ) en el que ocurren los eventos, lo que se puede sintetizar de la siguiente manera:

$$\mathcal{N}_\tau(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau; \overrightarrow{FA}) = e_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \cdot \mathcal{R}_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \quad (4.1)$$

Como ejemplo para una de las representaciones más sencillas de este modelo, se puede situar a la exposición como la combinación de la edad del involucrado con el tipo de usuario que representa al transportarse, por ejemplo, en una zona urbana, considerando el número promedio de kilómetros recorrido por unidad de tiempo (e_τ). A partir de esta descripción de atributos, el riesgo de verse involucrado en un ET puede calcularse como una función de la medición de e_τ , permitiendo estimar el número esperado de eventos en un colectivo o población y asociar esta medida con la letalidad de los ET sobre (ε, τ) , lo que permite estimar el número de defunciones, años de vida perdida y otros indicadores no observables directamente, además de obtener valores desagregados para distintas combinaciones de categorías de eventos, personas, vehículos, vías o territorios.

Desde luego, para diseñar una política pública, el ejemplo anterior configura un espacio de intervención que debe ser acotado, por lo que es deseable incluir la dimensión de la causa del ET en forma explícita cuando se trate de eventos — y explicitar el tipo de evento—, lo que implica estimar el número de ET y sus consecuencias en un grupo determinado que ya esté identificado por su tipo y severidad.

Para atender estas especificidades, las dimensiones que influyen en el número de lesionados y defunciones, así como los ET que han resultado fatales, estos componentes pueden incluirse al interior de la siguiente ecuación:

$$\mathcal{N}(\varepsilon, \tau; C_m) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau; \overrightarrow{FA}, C_m) = e_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}, C_m) \cdot \mathcal{R}_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}, C_m) \cdot I_\tau^{C_m}(\varepsilon, \tau) \quad (4.2)$$

De este modo, la ecuación 4.2 podría describir el número de *ET-No fatales* y distinguir a los involucrados lesionados de los no lesionados mediante $\mathcal{V}_t(\varepsilon) = \mathcal{U}_t(\varepsilon) + \mathcal{H}_t(\varepsilon)$, lo que permitiría reconstruir las estimaciones estadísticas en aquellos casos con distorsión a partir de las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5, permitiendo valorar los efectos, impactos y costes diferenciales en cada caso mediante las ecuaciones 4.1, 4.3 y 4.4

$$\mathcal{U}_\tau^{C_m}(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau; \overrightarrow{FA}) = e_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \cdot \mathcal{R}_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \cdot I_\tau^{C_m}(\varepsilon, \tau) \cdot I_\tau^U(\varepsilon, \tau) \quad (4.3)$$

$$\mathcal{H}_\tau^{C_m}(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau; \overrightarrow{FA}) = e_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \cdot \mathcal{R}_\tau(\varepsilon; \overrightarrow{FA}) \cdot I_\tau^{C_m}(\varepsilon, \tau) \cdot I_\tau^H(\varepsilon, \tau) \quad (4.4)$$

De la misma manera, el número de defunciones por cada causa para un conjunto de \overline{FA} de interés se puede estimar mediante

$$\mathcal{D}_{\tau}^{C_m}(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n ET_i(\varepsilon, \tau; \overline{FA}) = e_{\tau}(\varepsilon; \overline{FA}) \cdot \mathcal{R}_{\tau}(\varepsilon; \overline{FA}) \cdot I_{\tau}^{C_m}(\varepsilon, \tau) \cdot I_{\tau}^D(\varepsilon, \tau) \quad (4.5)$$

En donde

$$P[I_{\tau}^{C_m}(\varepsilon, \tau) = i] = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ es la causa del ET } C_m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$P[I_{\tau}^u(\varepsilon, \tau) = j] = \begin{cases} 1 & \text{si } j \text{ es la causa del ET } C_m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$P[I_{\tau}^D(\varepsilon, \tau) = k] = \begin{cases} 1 & \text{si } k \text{ es la causa de defunción } C_m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Ahora bien, antes de emplear estas ecuaciones para realizar las estimaciones para México, es útil señalar que, dado que existe toda una ecología para la ocurrencia de las DT, la interdependencia entre los riesgos por los distintos tipos de ET puede ser sumamente compleja y sus formas funcionales pueden aparecer incompletas o ser desconocidas. No obstante, dado que lo más probable es que las variables latentes de exposición, riesgo, vulnerabilidad y consecuencia no sean independientes entre sí, se sugiere no utilizar el supuesto de independencia como una hipótesis automática de trabajo, incluso si en algunas ocasiones se asume que estas variables son ortogonales con el fin de simplificar los cálculos.

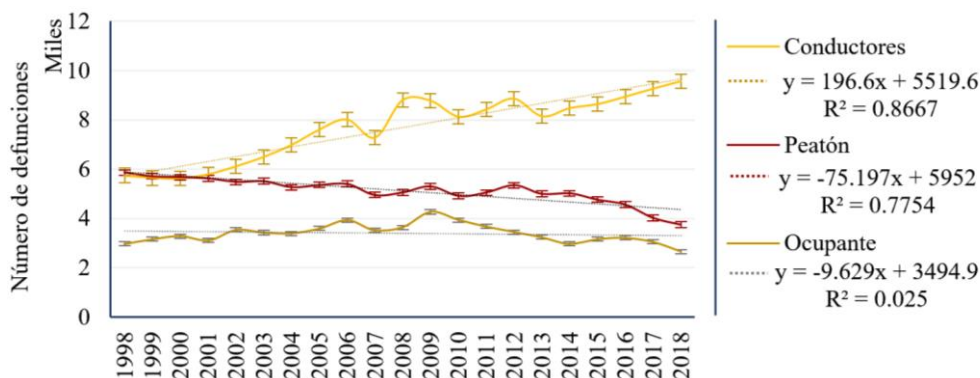
Como se ha visto con anterioridad, la experiencia de México en las últimas dos décadas señala que han fallecido 340,108 personas por ET. Con el fin de analizar la vulnerabilidad y su impacto y evolución en diversos grupos, se puede iniciar el análisis de los peatones, que representan a los usuarios más vulnerables en la vía (Shinar, D., 2012; Chong, S., Poulos, R., Olivier, J., Watson, W. L., & Grzebieta, R. 2010).

En la Figura 4.1 se observa la evolución temporal del número de defunciones para tres tipos de usuario con sus respectivas tendencias: *peatones*, *ocupantes de vehículo* y *conductores*. Como puede verse mediante la línea en rojo, en el periodo de estudio han fallecido 107,621 peatones, 31.64% del total de defunciones, de las cuales 5,862 ocurrieron en 1998 y 3,753 en 2018, lo que da cuenta de la tendencia decreciente señalada por la pendiente negativa de la regresión de la serie de tiempo, un hecho muy positivo que va en la dirección de los acuerdos suscritos con la Unesco mediante los objetivos del DASV y el ODS-3.

Por su parte, el grupo de los ocupantes de vehículo posee una dinámica menos monótona, ya que han experimentado una tendencia creciente en el periodo 1998-2006, pero a partir de 2009 se han mantenido en descenso, lo que las coloca en las mismas cifras de 1998, alrededor de 2,700 defunciones anuales. En el sentido opuesto se encuentran los conductores, quienes han mantenido un aumento

sostenido a lo largo del tiempo —con la respectiva turbulencia durante 2007-2011— y que en 20 años han logrado acumular un aumento en números absolutos de 66%, ubicándose cerca de las 10,000 defunciones anuales.

Figura 4.141. Número de defunciones por tipo de usuario de la vía, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

El tipo de evento que opera sobre el peatón, es decir, aquel en el que un vehículo embiste a la víctima, es muy importante, ya que es frecuente que los mecanismos de las propias lesiones impliquen que estas sean graves. Hace algunos años, Ashton (1979) mostró que si bien el 1.5% de los accidentes de peatones que involucran a niños fueron atropellamientos, estos constituyeron casi la mitad de los *ET-Fatales*. En México la situación también luce dramática: en 1998, el porcentaje de defunciones por ET en menores de 4 años peatones se ubicaba en 56%, porcentaje que se redujo a 26% en 2018, pero continúa siendo inaceptable.

Aunque no conocemos estudios tan detallados para los datos de México, se sabe que una parte importante de estos incidentes ocurren con frecuencia en las entradas para vehículos o en los estacionamientos al conducir en reversa (Brison et al., 1988). De hecho, al examinar los ET que involucran a niños de cuatro años o menos, 24 de 71 de los eventos fatales analizados fueron en reversa (Brison et al., 1988); por su parte, un estudio británico (Ashton, 1979) mostró que 2 de 15 *ET-fatales* también fueron en reversa contra niños menores de 4 años. Aunque estos estudios son relativamente antiguos y la composición de los atropellamientos ha cambiado desde entonces, estos hallazgos demuestran la importancia de prevenir este tipo de eventos y dotar de dispositivos, como cámaras y sensores de alerta, que ayuden a evitar que sean fatales.

Ahora bien, dado que la cinemática subyacente a un ET constituye una relación entre proporciones físicas, los eventos entre vehículos motorizados y ciclistas también implica un choque entre niveles distintos de vulnerabilidad. Obviamente, tanto los peatones como los ciclistas se encuentran desprotegidos y en clara desventaja respecto a los ocupantes de un automóvil, debido no solo al peso

y la velocidad, sino a la inercia y las reacciones que estas magnitudes físicas producen en unos y otros, sin contar el probable caparazón protector y las diferencias en los dispositivos de seguridad de cada caso.

No obstante, a pesar de que ambos son mucho más ligeros que los vehículos motorizados y ambos operan en condiciones iniciales similares, existen diferencias importantes que deben ser consideradas. Por un lado, los ciclistas tienen centros de gravedad más altos que los peatones (Peng et al, 2012, Watson, 2010) y la interacción entre ciclistas y tráfico motorizado difiere de la interacción entre peatones y vehículos motorizados, lo que resulta en una postura inicial diferente contra vehículo.

Finalmente, los ciclistas viajan a mayor velocidad que los peatones y eso supone un mayor riesgo de descontrol. Los estudios de simulación han demostrado que los ciclistas tienen una mayor tendencia a tener una fase de deslizamiento sobre el vehículo en comparación con los peatones (Maki et al., 2003, Watson, 2010), otro estudio de simulación mostró que los ciclistas giraban en la colisión (Ito et al., 2014); además, las pruebas de choque con maniqués han demostrado que el impacto en la cabeza es más alto en el automóvil en comparación con los peatones golpeados (van Schijndel et al., 2012), lo que a menudo se convierten en factores que modifican las consecuencias del ET y aminoran su letalidad y severidad.

Para estimar y modelar la intensidad de la mortalidad en estos grupos como efecto del riesgo producido por las DT e incorporar el aumento de población, se propone un conjunto de nuevas ecuaciones a partir de la siguiente definición.

Definición 4.79. La tasa de mortalidad de las DT en un grupo de población $\psi_t^i(\varepsilon)$ sobre el espacio ε y en el tiempo t , está dada por

$$\begin{aligned} m_t^\psi(\varepsilon) &= m_t(\varepsilon; \psi) = \frac{E[\mathcal{D}_t(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon; \psi)] \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \\ &= \frac{E[\mathcal{N}_t(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_t(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi)] = \frac{n_t(\varepsilon; \psi)}{\pi_t(\varepsilon)} \cdot \lambda_t^\psi(\varepsilon) = i_t(\varepsilon; \psi) \cdot \lambda_t^\psi(\varepsilon) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Con $E[\mathcal{D}_t^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi)] = d_t^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi) \forall j$ en cada t .

Desde luego, la definición anterior se puede extender para cada grupo de usuarios, las cuales pueden estar dadas por distintas características de interés en un estudio particular, por ejemplo, su vulnerabilidad o exposición sobre el espacio ε y el tiempo t , o también por edad α , que se denota $m_{\alpha_t}^\psi(\varepsilon)$ para cada grupo de edad $g_{\alpha_k, \alpha_{k+1}}(\varepsilon)$. Así, $m(\cdot)$ continúa siendo la intensidad de las

defunciones por ET, generada por el proceso de riesgo operando en una población de *personas vulnerables*, como son los peatones sobre el espacio ε y el tiempo t , cuya estimación distribuye el riesgo $\mathcal{R}_t(\varepsilon; \psi)$ que origina las $\mathcal{D}_t(\varepsilon; \psi)$ entre la población total $\Pi_t(\varepsilon)$.

De este modo, como se observa en la ecuación 4.6, los dos procesos estocásticos que lo conforman son independientes, por lo que se cumple:

$$\begin{aligned} m_{\alpha_t}^{\psi}(\varepsilon) &= m_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi) = \frac{E[\mathcal{D}_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} = \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi)] \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \\ &= \frac{E[\mathcal{N}_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi)]}{E[\Pi_{\alpha_t}(\varepsilon)]} \cdot E[\mathcal{D}_{\alpha_t}^{(ET_j)}(\varepsilon; \psi)] = \frac{n_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi)}{\pi_{\alpha_t}(\varepsilon)} \cdot \lambda_{\alpha_t}^{\psi}(\varepsilon) = i_{\alpha_t}(\varepsilon; \psi) \cdot \lambda_{\alpha_t}^{\psi}(\varepsilon) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Que es equivalente al producto de la magnitud de la incidencia $i_{\alpha_t}(\varepsilon)$ en peatones, por la fuerza de la letalidad de los ET en dicho grupo de población, lo que permite estimar el coeficiente $\lambda_{\alpha_t}^{\psi}(\varepsilon)$ ya estudiado en el capítulo 3.

Otra de las bondades de este tipo de procedimientos en los que se agregan categorías, es su susceptibilidad a que la distribución de las defunciones sea modelada como una ley binomial mediante un planteamiento dicotómico —*ET-Fatal* versus *ET-No fatal*, Conductor versus No conductor, Vulnerable versus No vulnerable, etcétera—, es decir, plantear categorías que permitan partir al espacio de medida en dos: la categoría de interés y el complemento. De esta forma, la distribución de probabilidades de la ocurrencia en la categoría de interés se pueda modelar mediante $\psi_t(\varepsilon) \sim Bin(\pi_t^i(\varepsilon), p_t^i(\varepsilon))$, donde $\pi_t^i(\varepsilon)$ refiere al número de habitantes con la característica i en el tiempo t y el espacio ε , mientras que $p_t^i(\varepsilon)$ indica la probabilidad de que un individuo del grupo de población i , durante el tiempo t y el espacio ε , fallezca en un ET.

A partir de las estimaciones basadas en este planteamiento es posible calcular la oportunidad relativa de que las defunciones por ET ocurran en los peatones, ciclistas, pasajeros, o elegir cualquier otro grupo etario o poblacional de interés con el fin de realizar las estimaciones de $p_t^i(\varepsilon)/(1 - p_t^i(\varepsilon))$ y su probable evolución mediante los modelos de predicción de series de tiempo ya expuestos.

Con el fin de estudiar las defunciones de personas altamente vulnerables en la vía pública, se puede agrupar a peatones, ciclistas y motociclistas, quienes son siempre los más expuestos y quienes sufren las peores consecuencias ante un ET —en el orden nombrado—, debido a múltiples factores, comenzando por el diferencial en las variables que intervienen en la severidad del evento y de sus

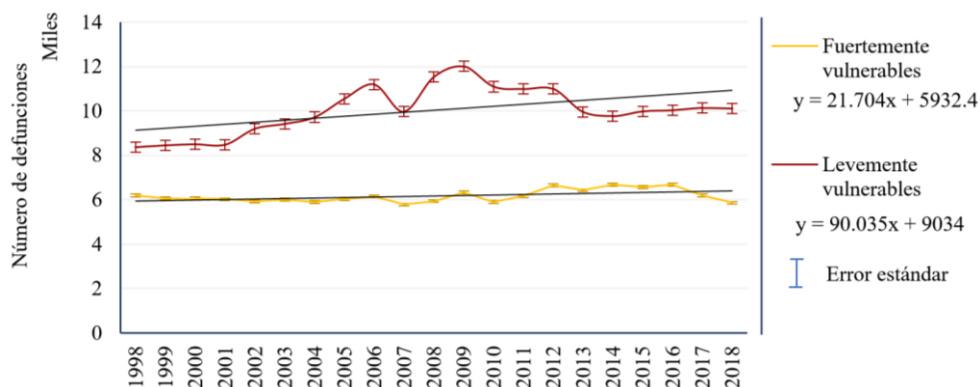
consecuencias —tales como masa, velocidad de movimiento al momento del impacto e inercia potenciales, entre otras—.

De acuerdo con OMS-OPS (2019), en casi todas partes, el riesgo de morir a causa de un ET es mucho mayor para los usuarios *fuertemente vulnerables* (PFV) —peatones, ciclistas y motociclistas— que para los *levemente vulnerables* (PLV) —ocupantes de vehículos— (Shinar, D., 2012; Chong, S., Poulos, R., Olivier, J., Watson, W. L., & Grzebieta, R. 2010; Koh, P. P., Wong, Y. D., & Chandrasekar, P., 2014)). En México el número de defunciones por ET de personas PFV entre 1998 y 2018 asciende a 129,595 —38% del total de defunciones por ET—, mientras que en el mismo periodo se registraron 210,513 defunciones de PLV por la misma causa. Asimismo, en 1998 hubo 6,196 defunciones de PFV — y 8,379 PLV, la proporción de defunciones de PFV es 42.5% con un ratio PFV/PLV de 0.74, que en 2018 disminuyó a 36.7% y 0.58, respectivamente.

En la Figura 4.2 se muestran los resultados de las estimaciones para el grupo de PFV en la serie 1998-2008. La línea amarilla señala que el número de defunciones de PFV es relativamente estable, la línea de tendencia dada por la regresión marca como inicio 5,932 defunciones y una tendencia creciente con pendiente de 21.7 defunciones adicionales por año. En lo que respecta a los ocupantes de vehículo, el origen comienza en 9,034 defunciones y la pendiente agrega 90 defunciones anuales en promedio, lo que sobreestima ligeramente a las 10,107 defunciones registradas.

A pesar de que las variaciones del periodo 2007-2011 afectan los estimadores y los pronósticos lineales, es claro que las defunciones de PLV continúan en aumento y que las de PFV se han mantenido bajo control a lo largo del tiempo.

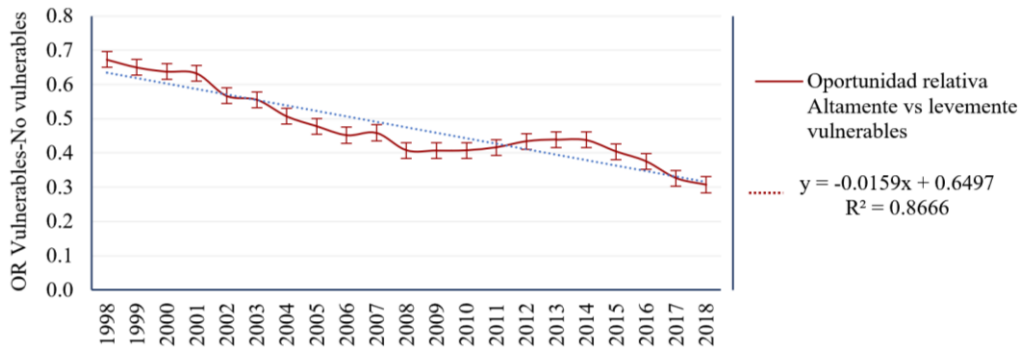
Figura 4.142. Evolución de las defunciones de *personas fuerte y levemente vulnerables*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para confirmar la evolución de las variaciones proporcionales de ambas series, en la Figura 4.3 se muestra la oportunidad relativa dada por las estimaciones de $p_t^i(\varepsilon)/(1 - p_t^i(\varepsilon))$ para PFV.

Figura 4.143. Oportunidad relativa entre *personas fuerte y levemente vulnerables*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En primer lugar resalta el descenso sostenido que logra acumular: -39% en diez años, pasando de 0.67 a 0.41, un umbral sobre el que se mantuvo por 7 años para después disminuir otros 10 puntos porcentuales en los últimos cuatro años, logrando una disminución acumulada de -54%, de 0.67 a 0.31, lo que se traduce en pasar de 5.8 defunciones por cada cien mil habitantes a 2.9, una disminución que, ante todo juicio, puede valorarse como un gran resultado que merece la revisión cualitativa de las principales acciones detrás de esta variación.

Como puede observarse, plantear categorías para estudiar situaciones o grupos de población en forma dicotómica abre múltiples posibilidades conceptuales e instrumentales, por lo que su planteamiento es vital para analizar políticas públicas, especialmente si se desea medir el impacto de las diversas iniciativas. Como se ha señalado anteriormente, entre las PFV, los peatones son los usuarios de mayor vulnerabilidad y, a menudo, también los de mayor exposición, lo que invita a profundizar en su estudio como grupo focal para considerar a todos los demás tipos de usuario registrados en las defunciones como 'no-peatones' para realizar el análisis de su situación y su probable evolución.

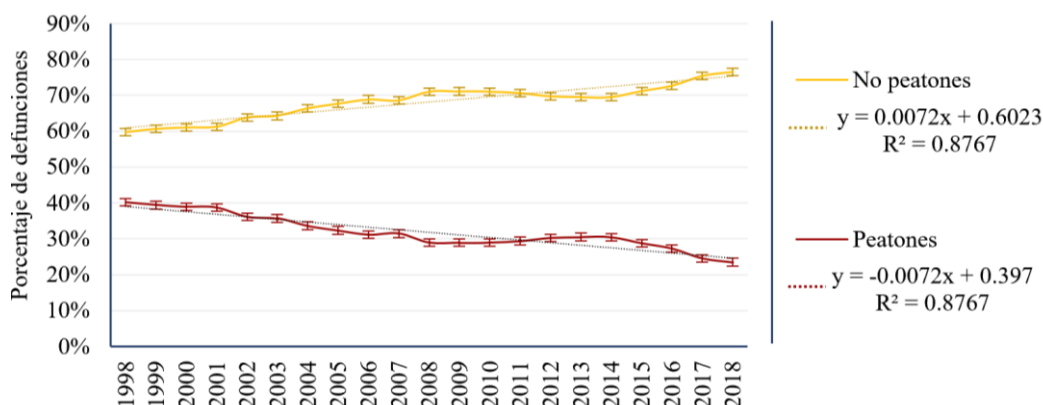
Desde una perspectiva colectiva, la evolución de la serie de tiempo de la Figura 4.3 indica que las defunciones de peatones por ET ha ido en descenso; sin embargo, para analizar la magnitud de los cambios, puede ser más útil agruparlos como peatones y colocar a todos los otros grupos como su complemento. Dado que este caso de disminución de las defunciones de peatones por ET ha llamado enormemente la atención de algunas autoridades, se sugiere realizar un análisis multicausal a nivel micro, así como involucrar teorías de decisiones y del comportamiento, especialmente en lo que refiere a los cambios en la aversión al riesgo de las cohortes y los diversos mecanismos implementados para desincentivar conductas de riesgo, lo que brindaría el potencial de comprender y establecer que

acciones fueron las más potentes y reconocer las mejores prácticas que permitirían expandir sus efectos hacia zonas menos beneficiadas por esta importante reducción en la mortalidad de los peatones.

De acuerdo con las prácticas documentadas en la literatura especializada (Cervantes, 2018), en el grupo de defunciones de peatones lesionados por ET es deseable integrar todas las categorías en el catálogo comprendidas por los códigos V01-V09, lo que se ha realizado en esta investigación para dar origen a una serie de tiempo que representa el total de defunciones anuales por ET y que puede descomponerse como la suma dos series: peatones + no – peatones, de este modo se asegura la adecuada contabilidad de las defunciones $\mathcal{D}_t(\varepsilon) = \mathcal{D}_t(\varepsilon; \text{peatones}) + \mathcal{D}_t(\varepsilon; \text{no – peatones})$, además, como las intensidades son aditivas, se cumple que $\mathcal{D}_t(\varepsilon) = i_t(\varepsilon; \text{peatones}) \cdot \lambda_t(\varepsilon; \text{peatones}) + i_t(\varepsilon; \text{no – peatones}) \cdot \lambda_t(\varepsilon; \text{no – peatones})$.

Para confirmar la divergencia en la evolución de ambos grupos peatones y su complemento —no-peatones—, en la Figura 4.4 se muestran las series de tiempo del número de defunciones en estos dos grupos y el efecto de integrar a todas las categorías en el complemento. Además, como las series son complementarias en su participación relativa dentro de todos los ET registrados, sus variaciones también lo son, por lo cual sus tendencias presentan coeficientes simétricos ($slope = \pm 0.0072$), lo que implica que cada año las defunciones por ET aumenten —o disminuyan— un promedio de 0.72% respecto al año previo, permitiendo predecir los valores futuros con altos niveles de significancia estadística debido a su baja variabilidad a lo largo del tiempo, la cual es captada por el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8767$, $p < 0.001$), que es también el mismo para ambas series.

Figura 4.144. Evolución de los porcentajes de defunciones de peatones y no-peatones, 1999-2018

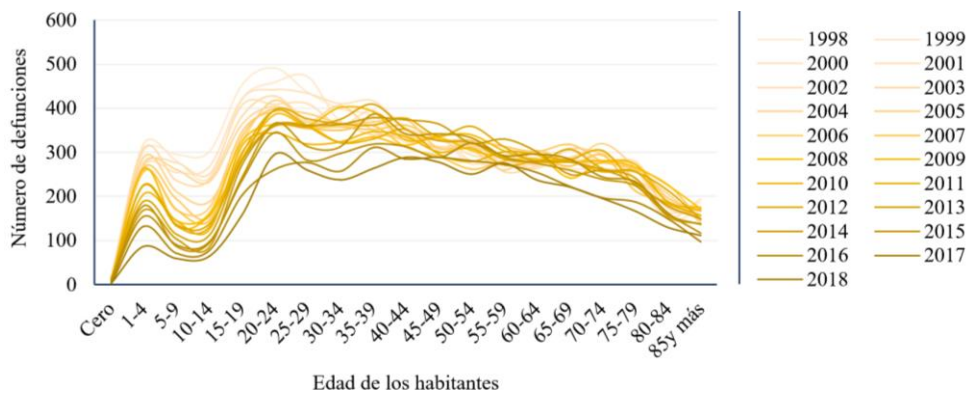


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, las defunciones de los peatones redujeron su frecuencia relativa en 41.6% y los no-peatones aumentaron 28%, lo que sugiere conocer la magnitud de las variaciones en los distintos grupos etarios que componen a la categoría peatones.

En la Figura 4.5 se muestra la evolución de las defunciones en cada grupo quinquenal a lo largo del tiempo. Como puede observarse, el promedio de los menores de 1 año es bastante bajo —10 defunciones en todo el territorio— y además posee una tendencia claramente negativa que comienza con 13 en 1998 y llega a 3 en 2018. Por su parte, el grupo entre 1 y 14 años también ha reducido progresivamente sus defunciones, de tal manera que en 1998 registró 900 defunciones y en 2018 apenas reunió 209, lo que representa una disminución de 76.8%, sin duda un gran avance que, al igual que los otros grupos, abona a la reducción general de 37.3% en el número de peatones fallecidos.

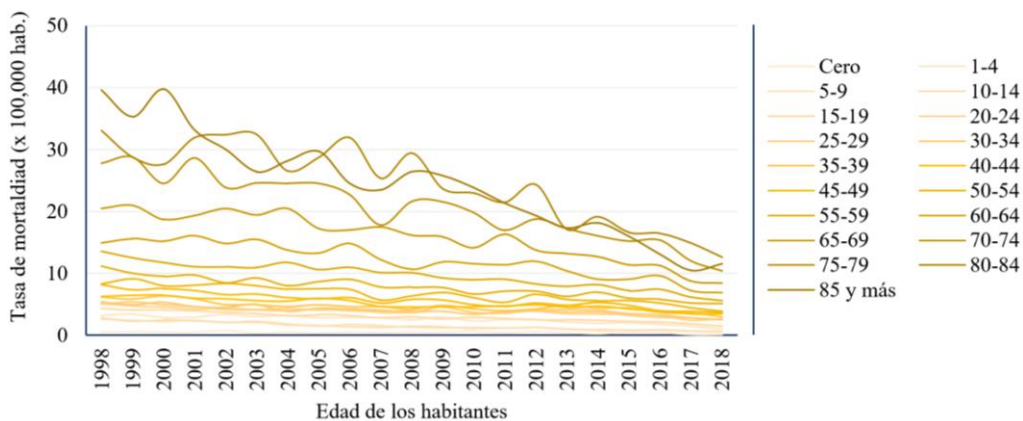
Figura 4.145. Evolución del *número de defunciones de peatones* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Entre otros rasgos de la distribución de las defunciones en peatones y su tendencia decreciente a través de los años, resulta notable que, aunque no son el primer lugar en números absolutos, los grupos de personas con mayor edad presentan también las mayores tasas de mortalidad —40 defunciones por cada 100,000 habitantes para 85 y más—, siendo hasta 8 veces mayor a la mostrada por el grupo con el menor número de defunciones y hasta 80 veces la tasa observada en los menores de 1 año, el grupo de peatones con la menor tasa de mortalidad.

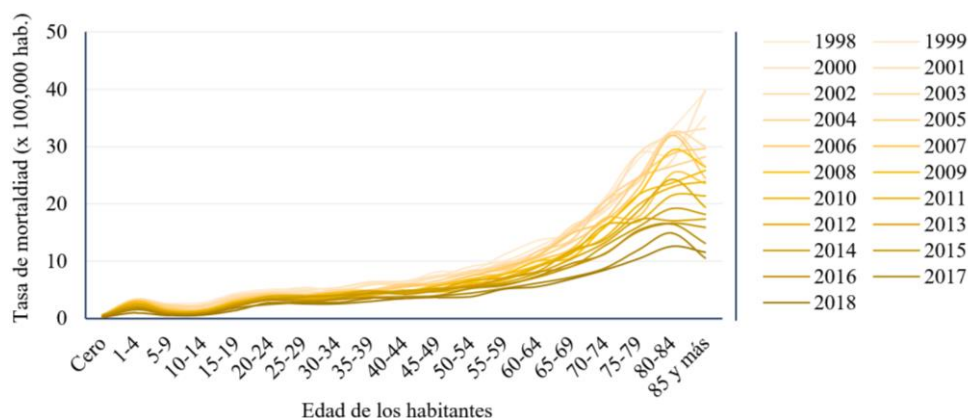
Figura 4.146. Evolución de las *tasas de mortalidad de peatones* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como se ha visto, la fuerza de mortalidad señala en qué grupos de edad el fenómeno ocurre con mayor intensidad respecto al tamaño de población. En la Figura 4.7 se muestran estas fuerzas para los grupos etarios durante todos los años en el periodo 1998-2018. La intensidad de las defunciones en los mayores de 65 ayuda a entender que sea también este grupo el que muestra la reducción más visible en los últimos 20 años: de 400 defunciones en 1998 a 500 en 2018, lo que se traduce en -56% del valor inicial, que coincide con el descenso general y que, para ninguna edad, la tasa sea superior a 13 defunciones por cada 100,000 habitantes.

Figura 4.147. Contraste de las fuerzas anuales de mortalidad en peatones, 1998-2018



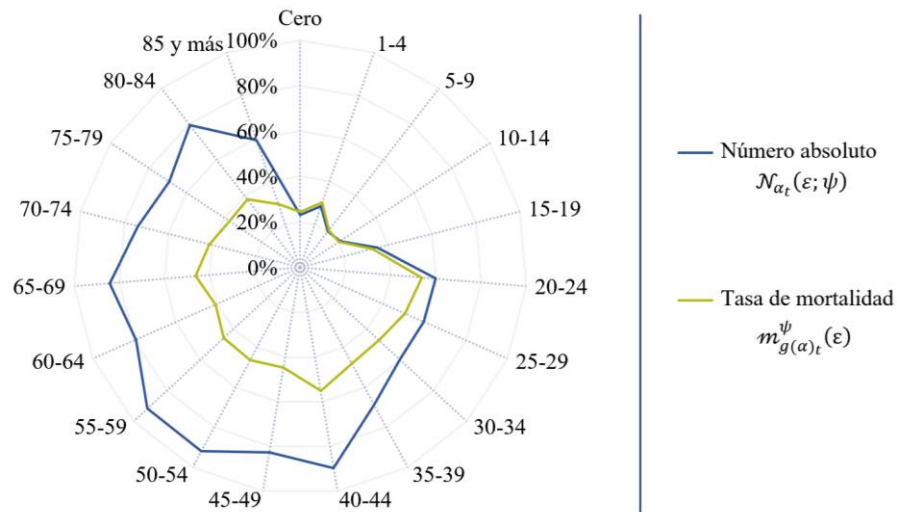
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Ahora bien, con el fin de comparar la magnitud de las variaciones en las últimas dos décadas, la Figura 4.8 muestra las variaciones entre 1998 y 2018 para los valores absolutos y las tasas que toman en cuenta el tamaño poblacional de cada grupo. En cifras brutas —representadas por la línea azul—. En este contraste, resulta notable la reducción en los menores de 19 años, especialmente de 0 a 14 años. Sin embargo, al revisar las fuerzas de mortalidad dadas por la línea verde, se observa que el porcentaje de reducción supera al 45% en todos los casos

Lo anterior permite concluir que el avance en este sentido es sumamente satisfactorio ya que, por ejemplo, en el caso de las personas entre 50 y 54 años, a pesar de que el número de defunciones se redujo solo 8% —lo que podría parecer muy poco—, al considerar que la población prácticamente se duplicó en el mismo periodo, la reducción de la tasa se vuelve sumamente relevante.

Para aumentar el nivel informativo de las desagregaciones, es factible diseñar estudios poblacionales retrospectivos, para lo cual se requiere estimar las tasas de mortalidad y las tendencias específicas para los grupos de edad de los peatones, lo que se puede realizar a través de un modelo de regresión logística (Dobson, A. J., & Barnett, A. G., 2018; Hilbe, J., 2009) que permita estimar la familia de probabilidades y modelar las tendencias de las defunciones.

Figura 4.148. Variación en las *defunciones totales* y las *tasas de mortalidad* entre 1998 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Ahora bien, con el fin de estudiar propiedades de la serie y realizar pronósticos sobre sus valores futuros con base en probabilidades, se propone realizar un análisis de variables categóricas, estrategia econométrica que ha ido en aumento en los últimos años, especialmente al utilizar modelos logísticos generalizados, ya que este enfoque se ha centrado en describir interacciones o asociaciones entre variables categóricas que permiten el uso de pruebas de significancia estadística.

Además, a través de estos modelos es posible manejar situaciones complicadas y analizar los efectos simultáneos de múltiples variables, incluidas mezclas de variables categóricas y continuas. La forma estructural del modelo permite describir patrones de interacciones y asociaciones y los parámetros del modelo proporcionan medidas de la fuerza de las asociaciones.

De este modo, el centro de atención reside en estimar los parámetros del modelo que permiten el empleo de las herramientas en el núcleo de la inferencia, tales como la estimación puntual, las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza sobre las estimaciones paramétricas, lo que implica las siguientes consideraciones:

1. El término *Modelo lineal general* (GLM por sus siglas en inglés) refiere a modelos de regresión lineal convencionales para una variable de respuesta continua dados por predictores que pueden ser continuos o categóricos (Dobson, A. J., & Barnett, A. G., 2018)). Incluye regresión lineal múltiple, así como ANOVA y ANCOVA —que solo considera efectos fijos. La forma funcional es

$$y_i \sim N(x_i^T \beta, \sigma^2), \text{ donde } x_i^T \text{ contiene covariables conocidas y } \beta \text{ contiene los coeficientes a estimar.}$$

2. Estos modelos se ajustan por mínimos cuadrados y mínimos cuadrados ponderados mediante métodos de convergencia convencionales que son variantes métodos numéricos de aproximación a soluciones no exactas.
3. El término modelo lineal generalizado (GLIM o GLM) se refiere a una clase más amplia de modelos popularizados por McCullagh y Nelder (1989). En estos modelos, se supone que la variable de respuesta y_i sigue una distribución familiar exponencial con media μ_i , que se supone que es alguna función —casi siempre del tipo no lineal— que involucra funcionalmente a $x_i^T \beta$.
4. El término más apropiado sería denominarlos ‘no lineales’, ya que μ_i es casi siempre una función no lineal de las covariables, pero McCullagh y Nelder las consideran lineales, porque las covariables afectan la distribución de y_i a través de la combinación lineal de $x_i^T \beta$.

En general, los modelos GLM poseen tres componentes:

- **Componente aleatorio:** que refiere a la distribución de probabilidades de la variable de respuesta (Y); denominada usualmente como *modelo de ruido* o *modelo de error*.
- **Componente sistemático:** especifica las variables explicativas (X_1, X_2, \dots, X_k) en el modelo mediante su combinación lineal con el fin de ensamblar el *predictor lineal*
- **Función de enlace,** denotada como η o $g(\mu)$, que especifica el enlace entre componentes aleatorios y sistemáticos para especificar cómo se relaciona el valor esperado de la respuesta con el predictor lineal de las variables explicativas

Como todo modelo, los GLM emplean supuestos, que en este caso son los siguientes:

1. Los datos Y_1, Y_2, \dots, Y_n se distribuyen de forma independiente, es decir, las ocurrencias de los eventos son independientes entre sí.
2. La distribución de la variable dependiente Y_i no requiere seguir una ley gaussiana, por lo que es usual suponer que sigue alguna distribución de la familia exponencial.
3. No es necesario suponer una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes, la linealidad del modelo se asocia a la respuesta transformada en términos de la función de enlace y las variables explicativas.
4. No es necesario satisfacer la homogeneidad de la varianza. De hecho, dada la estructura del modelo, no es posible probarlo, por lo que se puede manejar una mayor dispersión a la esperada.
5. Los errores deben ser independientes entre sí, aunque no es necesario que estos se distribuyan normalmente.

6. La estimación paramétrica es vía máxima verosimilitud (MLE) y no por mínimos cuadrados ordinarios (MCO), lo que demanda aproximaciones con muestras grandes.
7. Las medidas de bondad de ajuste se basan en muestras suficientemente grandes.

Como puede verse, el modelo GLM es bastante flexible, por lo que las variables independientes pueden ser modeladas como funciones con términos de potencia o algunas otras transformaciones no lineales de las variables independientes originales²⁹. Para aprovechar estas bondades, existen diversas especificaciones funcionales sobre las características de la variable dependiente $Y_{i,t}$, que después puede extenderse a una familia $Y_{i,t}^\psi$ con el fin de analizar situaciones dicotómicas e identificar y analizar categorías de usuarios, consecuencias o tipos de ET, por ejemplo, peatones versus no-peatones, vulnerables versus no vulnerables, etcétera.

En este sentido, las pocas investigaciones al respecto señalan que es adecuado el uso de la regresión logística binaria, una forma poco común de regresión que, en realidad, es muy similar a las especificaciones lineales en términos de uso e interpretación, pero en la que el tipo de variable dependiente no es continua, sino binaria —peatones/no-peatones, hombre-mujer, vulnerables-no vulnerables, etcétera— para modelar alguna de las dicotomías propuestas, lo que invoca a la razón de probabilidades, ampliamente utilizada en este estudio como una medida asociada a las probabilidades de que una situación suceda en un grupo en comparación con las probabilidades de que la misma situación suceda en otro grupo.

En concreto: la regresión logística binaria permite estimar la probabilidad de que una característica esté presente en un valor observado, dados los valores de las variables explicativas, en este caso una única variable categórica; $\pi_i = P(Y_i = 1 | X_i = x_i)$, en donde Y_i es una variable de respuesta binaria tal que:

- $Y_i = 1$ si el rasgo está presente en la i -ésima observación
- $Y_i = 0$ si el rasgo no está presente en la i -ésima observación
- $(X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{k,t})$ es un conjunto de variables explicativas que pueden ser discretas, continuas o una combinación de ellas,
- x_i es el valor observado de las variables explicativas para la observación i .

De este modo, como la variable de respuesta binaria $Y_{i,t}$ depende de un conjunto de kxt variables explicativas que a su vez dependen del tiempo t , $\mathbf{X} = (X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{k,t})$, entonces

²⁹ Para una discusión más detallada puede consultarse Agresti (2013) o McCullagh y Nelder (1989).

$$\pi_{i,t} = P(Y_{i,t} = 1 | X_{i,t} = x_{i,t}) = \frac{\exp(\beta_{0,t} + \beta_{1,t}X_{1,t})}{1 + \exp(\beta_{0,t} + \beta_{1,t}X_{1,t})}$$

$$\text{logit}[\pi] = \log \left[\frac{\pi}{(1 - \pi)} \right] = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}X_{1,t} + \dots + \beta_{k,t}X_{k,t} \quad (4.8)$$

que modela las probabilidades logarítmicas de probabilidad de ‘éxito en la observación de un caso de interés’ en función de las variables explicativas para cada punto del tiempo. Como la variable de respuesta binaria $Y_{i,t}(\varepsilon)$ depende de un conjunto de variables explicativas indexadas con el binomio (ε, t) , entonces $\mathbf{X} = (X_{1,t}(\varepsilon), X_{2,t}(\varepsilon), \dots, X_{k,t}(\varepsilon))$, por lo que al incluir el espacio ε se completa el análisis territorial mediante la definición de los componentes en la forma siguiente:

- **Componente aleatorio:** la distribución de $Y_{i,t}(\varepsilon)$ sigue una ley binomial, es decir, $Y_{i,t}(\varepsilon) \sim \text{Bin}(n_t^i(\varepsilon), p_t^i(\varepsilon))$, donde $p_t^i(\varepsilon)$ es una probabilidad de observar la característica en estudio.
- **Componente sistemático:** el conjunto $(X_{1,t}(\varepsilon), X_{2,t}(\varepsilon), \dots, X_{k,t}(\varepsilon))$ son variables explicativas, y son lineales en los parámetros, por ejemplo, $\beta_{0,t} + \beta_{1,t}X_{1,t}(\varepsilon) + \dots + \beta_{k,t}X_{k,t}(\varepsilon)$
- **Función de enlace:** *enlace logit* dado por

$$\eta = \text{logit}[\pi] = \log \left[\frac{\pi}{(1 - \pi)} \right] \quad (4.9)$$

De manera general, el *enlace logit* modela las probabilidades logarítmicas de la media, dada por π . Los modelos de regresión logística binaria también son conocidos como *modelos logit* cuando todos los predictores son categóricos, quedando la siguiente ecuación logística:

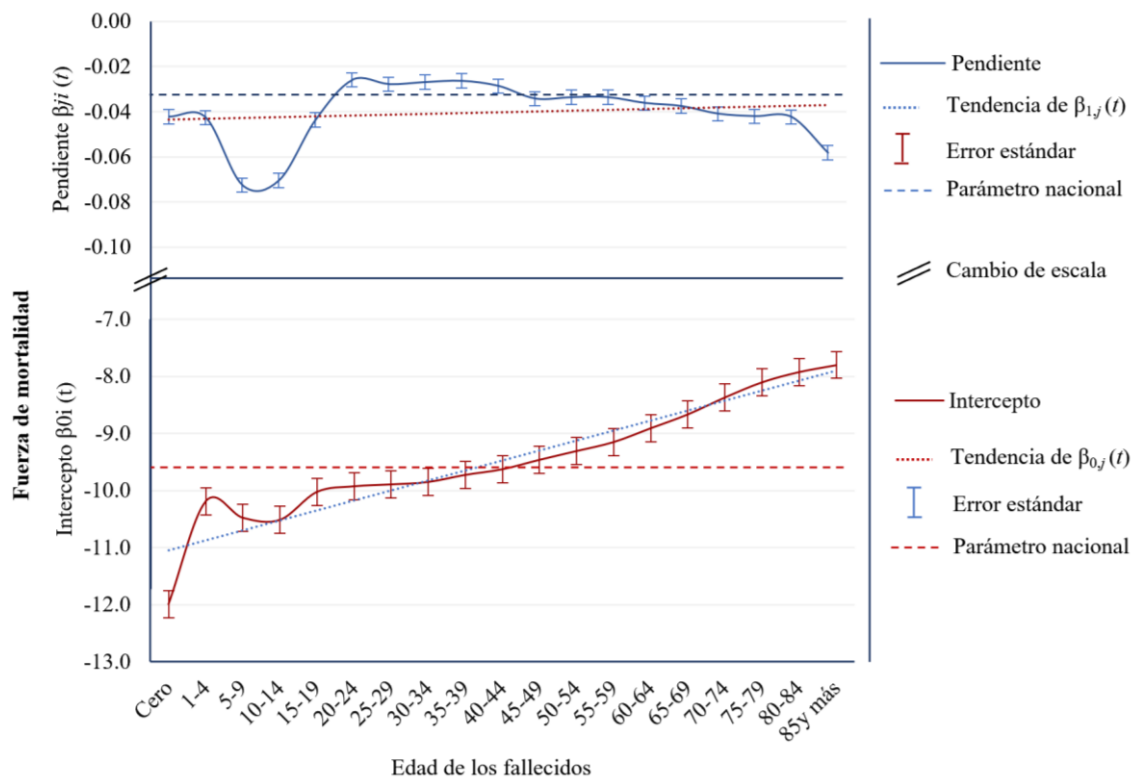
$$\log \left[\frac{p_t^i(\varepsilon)}{(1 - p_t^i(\varepsilon))} \right] = \beta_{0_i} + \beta_{j_i} \quad (4.10)$$

A partir del uso de esta ecuación, es posible encontrar los parámetros de regresión mediante la estimación de máxima verosimilitud usando para cada ajuste una prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado y verificando la significancia de cada parámetro con el estadístico *T de Student*, lo que se ha realizado aplicando un control con nivel de significancia $\alpha=0.05$ (Schober, P., Bossers, S. M., & Schwarte, L. A., 2018).

Por supuesto, las ventajas de incorporar esta ecuación son múltiples. Por ejemplo, la interpretación de sus parámetros es directa en la escala de lógitos y se transforma fácilmente a oportunidades relativas y probabilidades, ya que los parámetros β_{0_i} son un escalamiento de la oportunidad relativa de que una persona que fallece por un ET, en el i -ésimo grupo de edad, sea un peatón, estimación que indica el valor promedio en el inicio de la serie (1998), lo que se acompaña del parámetro $\beta_{i,j}$ para indicar la magnitud de los cambios anuales en esta medida.

En la Figura 4.9 se muestran los resultados de este procedimiento para obtener los parámetros de la regresión logística sobre la serie 1998-2018 para cada grupo etario, los cuales replican lo obtenido por otros investigadores con la ventaja de abarcar hasta el año 2018, un periodo que aún no ha sido reportado en la literatura científica (Cervantes, 2018).

Figura 4.149. Parámetros de la regresión logística por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

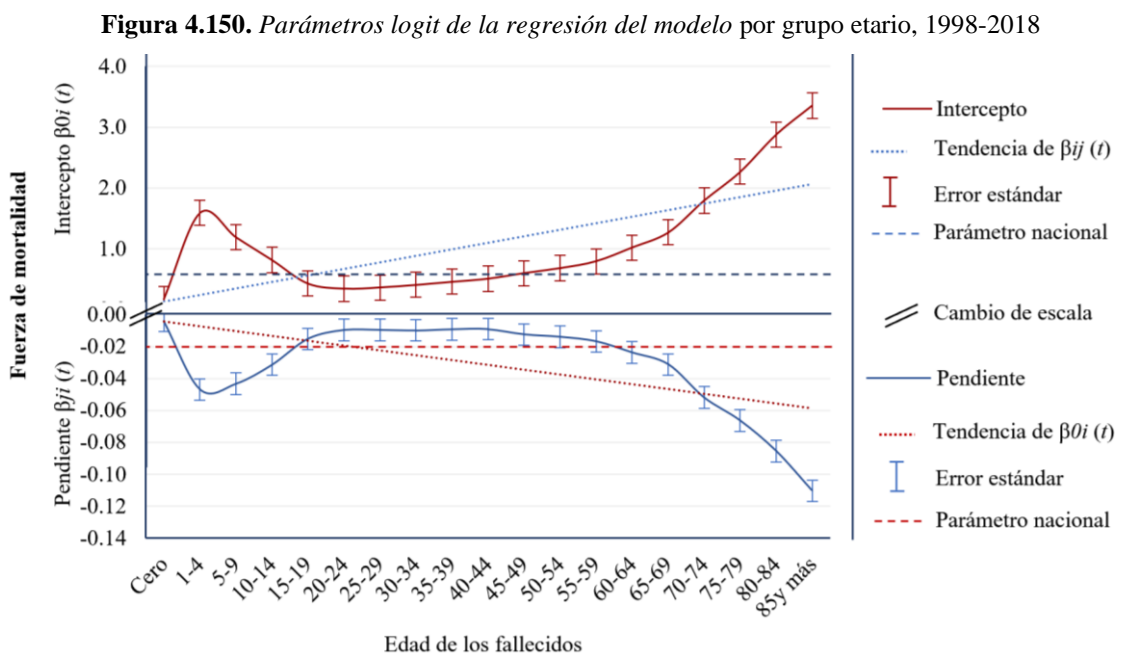
Como puede observarse en la Figura 4.9, la línea roja identifica las estimaciones del intercepto β_{0i} para cada grupo etario i —con sus respectivos errores estándar—, siendo el valor más bajo para los menores de 1 año (-12.0), que implica una probabilidad extremadamente baja de fallecer por un ET como peatón en 1998, para el cual la oportunidad relativa es 0.00001. Otra característica de los resultados es que, de los 0 hasta los 39 años, el lógito de los interceptos es inferior al valor nacional, lo que cambia conforme los peatones aumentan su edad, siendo la proporción de mayores de 85 bastante más significativa que en los jóvenes, lo que se traduce en una tasa 14 veces mayor en este grupo etario que en los menores de un año.

Por su parte, la línea azul de la Figura 4.9 muestra las tasas de variación en las distintas edades, como puede verse, todas son negativas, lo que señala que en todas las edades han disminuido las tasas de defunción de peatones por ET. Por ejemplo, a pesar del bajo nivel de fatalidades en los niños menores

de un año, la probabilidad de fallecer en un ET como peatón se redujo 77% para 2018, lo que los ha convertido en eventos inusitados. Sin embargo, es entre los 5 y los 14 años en donde más han disminuido las fatalidades, seguidos de los jóvenes entre 15 y 19 años y los adultos mayores de 65 años, que continúan presentando las mayores tasas de mortalidad, pero con una tendencia decreciente muy significativa.

A partir de lo anterior y con la finalidad de comprender la evolución de la mortalidad de los peatones, controlando el efecto de la composición poblacional, se puede modificar el planteamiento y referir la dicotomía *peatón* versus *no-peatón* a la situación condicional ‘después de ocurrido el fallecimiento por ET’, que plantea estimaciones distintas para los parámetros del componente aleatorio $Y_{i,t}(\varepsilon) \sim \text{Bin}(n_t^i(\varepsilon), p_t^i(\varepsilon))$, en particular para la familia de valores $\{p_t^i(\varepsilon)\}$, que ahora únicamente incorpora para su estimación a los datos relacionados con la ocurrencia de los ET.

De este modo, ahora el total de defunciones es el denominador de la probabilidad $p_t^i(\varepsilon)$, por lo cual la función de enlace dada por $\eta = \text{logit}[p_t^i(\varepsilon)] = \log\left[\frac{p_t^i(\varepsilon)}{1-p_t^i(\varepsilon)}\right]$ se modifica no solo en su escala sino en las propiedades cualitativas y cuantitativas de su función de distribución.



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En este caso, el parámetro β_{0i} puede entenderse como un escalamiento de la oportunidad relativa de que, dada una defunción por un ET, sea un peatón en el i -ésimo grupo de edad el que fallezca, estimada en el inicio de la serie (1998); así, ante esta interpretación, el parámetro β_{ij} indica los cambios anuales

en las estimaciones o en la probabilidad de que el usuario difunto sea un peatón. En las líneas de la Figura 4.10 se observa la evolución de los dos parámetros del GLM para cada grupo de edad.

De la figura anterior se desprende lo siguiente:

1. La línea roja señala las estimaciones para el intercepto $\beta_{0,j}(t)$ en cada caso. Los datos se presentan con escalamiento logarítmico —la estimación se ha realizado en lógitos—, lo que permite interpretar la medida como oportunidades relativas o razón de probabilidades.

De este modo, la estimación del parámetro nacional de 0.63 apunta al valor observado de 0.66 en 1998, el primer año de la serie, que puede interpretarse como el riesgo relativo de que un peatón fallezca por motivo de un ET —al inicio de la serie de tiempo—, siendo el valor unitario el riesgo asociado a la defunción de alguna de cualquier usuario, excepto un peatón.

También resulta de interés que los menores de 1 año posean un parámetro de intercepto de 0.17 que, a pesar de ser el más bajo de todos, podría esperarse que fuera igual o muy cercano a cero, lo que implica 17 defunciones ‘como peatones’ por cada 100 defunciones por ET en este grupo de edad.

Los peatones de entre 1 y 14 años son otro grupo etario en el que se observa un nivel de intensidad demasiado alto al inicio de la serie, siendo el parámetro del intercepto mayor a uno en todos los casos ($\beta_{0,j}(t) > 1$), lo que se traduce en que más de la mitad de los *ET-Fatal* ocurren en este grupo vulnerable.

En lo que respecta a las personas de 85 y más, el parámetro de 3.36 implica ‘que de cada 100 personas fallecidas con de más de 85 años, 76 son peatones’ —que es el parámetro más alto de todos y representa 20 veces a la razón de probabilidades de los menores de un año—, lo que muestra su enorme nivel de vulnerabilidad.

2. En lo que respecta a la línea azul, esta refiere al parámetro de pendiente $\beta_{1,j}$, que indica la velocidad con la que cambian las oportunidades relativas a través del tiempo. Como puede observarse, el valor de $\beta_{1,Nacional} = -0.034$ indica un decremento que coincide con la disminución en forma monótona que ha llevado al parámetro nacional de la oportunidad relativa de 0.66 en 1998 a 0.30 en 2018, lo que se traduce en una variación de -55% en la

participación relativa de los peatones en las defunciones por ET, respecto 2018, un cambio muy significativo producido a través de dos décadas.

Asimismo, aunque la pendiente en los menores de un año es -0.004, la variación del parámetro β_0 fue de -77%, pasando de 0.19 a 0.05, por lo que en 2018 solo se observaron 3 defunciones en esta edad.

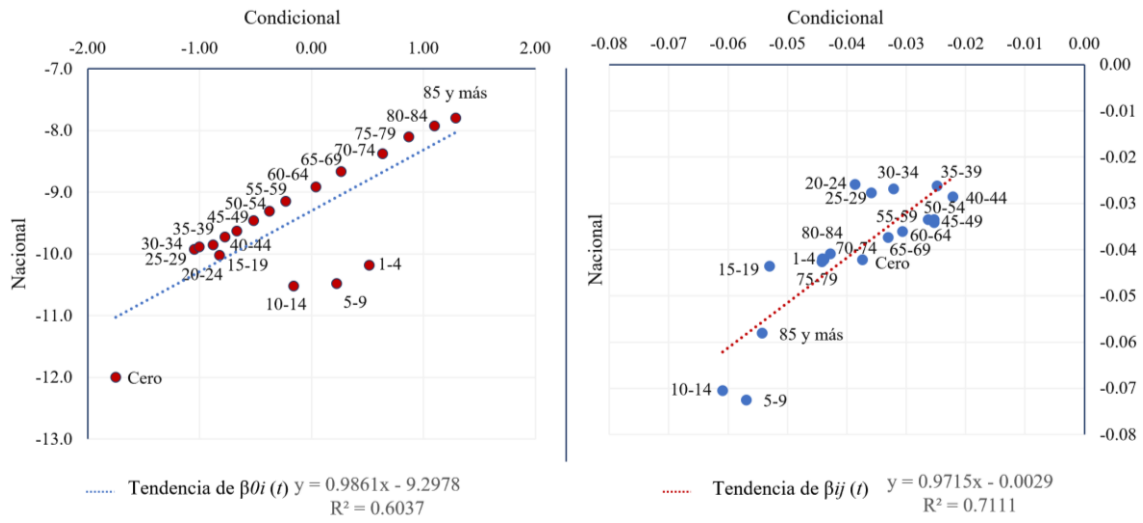
Por su parte, el grupo de entre 1 y 19 años también presenta coeficientes negativos significativos, lo que se refleja en una disminución muy importante de defunciones, un fenómeno que se corrobora en el cambio de la oportunidad relativa que pasó de 1.36 a 0.35, un decremento de 74% que implica que las niños y jóvenes hayan pasado de representar el 25% de los ET fatales en peatones, a un 10%, un enorme cambio en la dirección deseable, cuyos esfuerzos es deseable mantener.

Por último, los mayores de 85 años son los que muestran el coeficiente de pendiente más negativo ($\beta_{1,85 \text{ y más}} = -0.11$), propiciado por el cambio de 3.17 a 1.0, por lo que, en 2018, el riesgo de que un peatón fallezca en esta edad es similar a que sea cualquier otro usuario de la vía, ya que es igualmente probable que la defunción ocurra en alguno de los grupos.

A partir de estos resultados, una conclusión general es que, para todas las edades, los coeficientes de pendiente de las regresiones logísticas son negativos, lo que confirma que las defunciones de los peatones han disminuido con el paso del tiempo, siendo los peatones entre 1 y 19 años los de mayor mejora absoluta y los mayores de 85 años los que más redujeron su riesgo relativo.

Desde luego, dada que el componente central de las estimaciones de las probabilidades está dado por el número de peatones fallecidos en ET, ambos parámetros tienden a estar correlacionados en los grupos de edad, lo que se muestra en las dos gráficas de la Figura 4.11, la cual señala los valores de las estimaciones de ambos modelos para cada grupo etario. Desde luego, los valores nacionales son los que refieren a las estimaciones basadas en las tasas de mortalidad —que consideran al tamaño de población en cada grupo, mientras que la condicional se basa en las probabilidades condicionadas a que ocurra la defunción por ET.

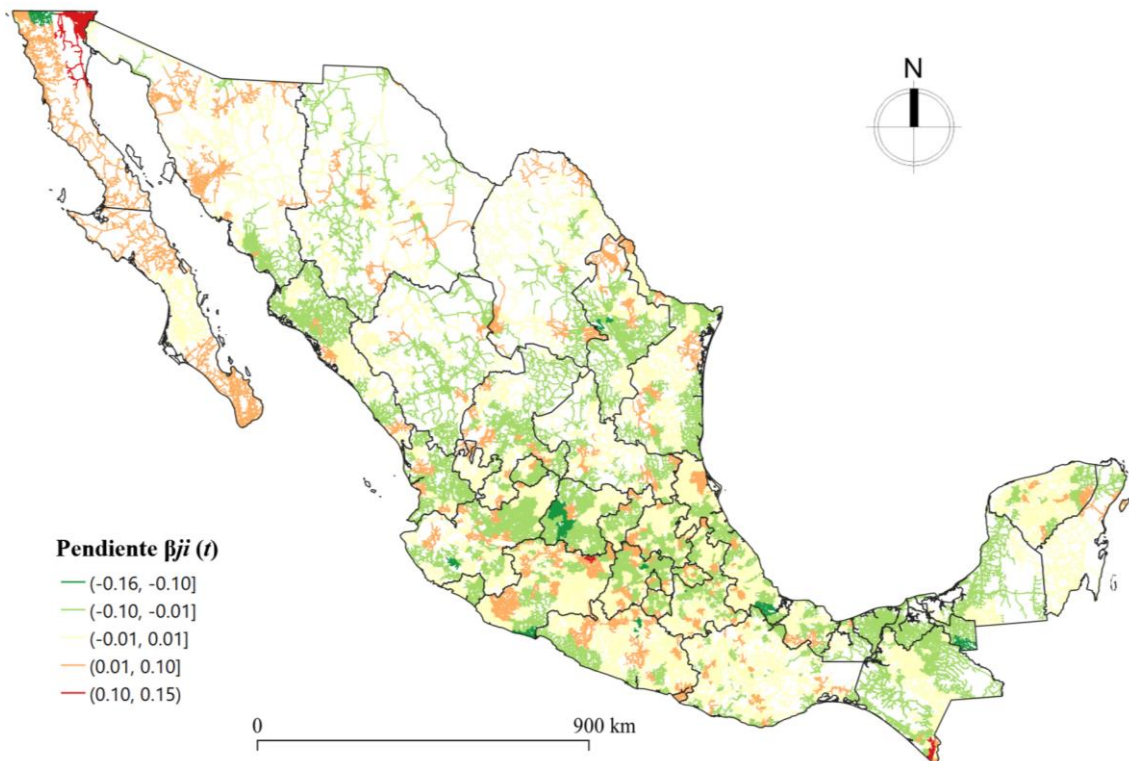
Figura 4.151. Relación entre *tasas de mortalidad y probabilidad de defunción por edad, 1998-2018*



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, en ambos casos la correlación es significativa, aunque no perfecta, resulta de interés que los valores de los interceptos para los menores de 14 años presentan alguna desviación respecto a las demás edades, lo que identifica el cambio de nivel experimentado en los últimos años motivado por la acelerada disminución de defunciones en estos grupos etarios.

Mapa 4.152. Variación de la *población municipal en el tiempo, 1997-2018*

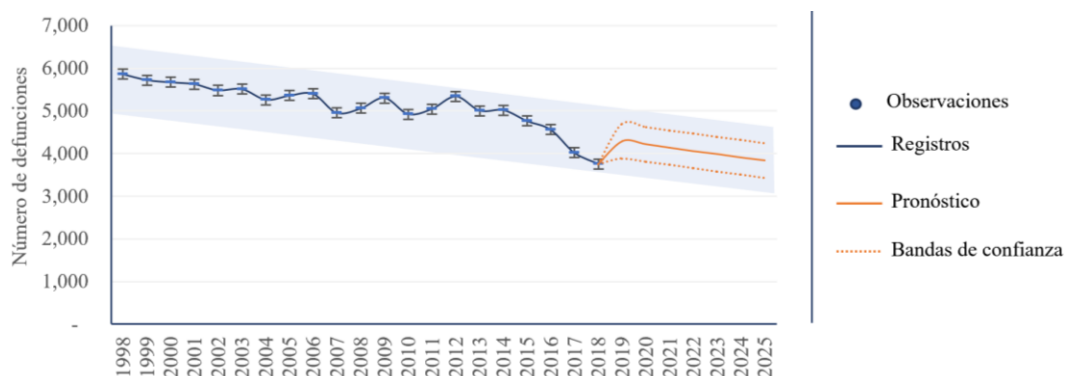


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para ampliar la información proveniente de este planteamiento, se ha extendido el análisis condicional a nivel municipal. En el Mapa 4.1 se muestran los resultados de la estimación de la pendiente de las oportunidades relativas dadas por $\beta_{1,j}$ donde j refiere a cada municipio para señalar las vías en donde han ocurrido defunciones de peatones motivadas por ET en color graduado, dado por la estimación de los coeficientes $\beta_{1,j}$ en los rangos señalados por la simbología; las líneas en color verde se asocian a una tendencia decreciente —pendiente negativa—, mientras que el color rojo indica el caso opuesto en el que la pendiente es positiva. Como puede verse, la dominación del color verde señala que, en la mayoría del territorio, las defunciones de peatones han ido disminuyendo, no obstante, en diversos municipios persiste el aumento de defunciones, lo que brinda elementos de reflexión sobre los desafíos que las autoridades de cada demarcación deben enfrentar, como es el caso de Mexicali, Tapachula y Oaxaca, en donde las defunciones relativas han aumentado considerablemente año tras año.

A partir de estos resultados es posible utilizar los modelos de series de tiempo para pronosticar la probable evolución de las defunciones de peatones por ET. La Figura 4.12 muestra el resultado las estimaciones y el resultado de las proyecciones mediante un modelo ARIMA (1,1,1), el cual presenta evidencias de continuar con una trayectoria descendente durante los próximos años para traspasar la barrera de los 4,000 defunciones y reducir en 50% las defunciones registradas en 1998, tal y como señalan las líneas punteadas en color naranja que corresponden a las bandas de confianza estadística (al 95% de confianza), estimadas a partir del mismo modelo.

Figura 4.153. Evolución y proyección del número de defunciones de peatones, 1998-2018

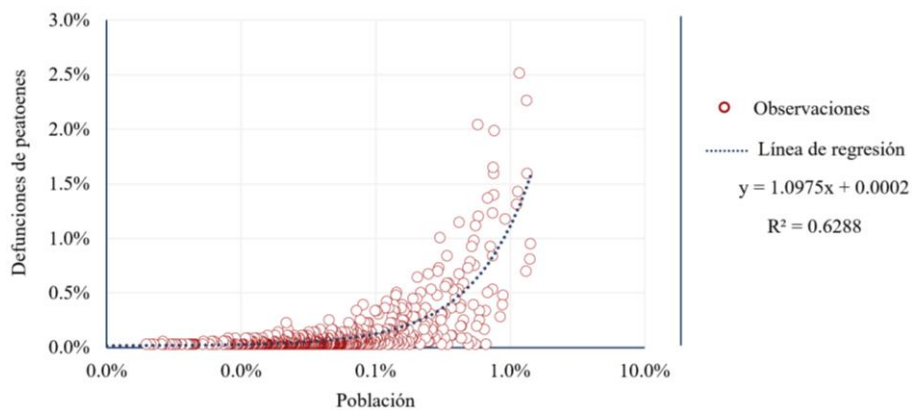


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otra característica interesante es que el número de peatones fallecidos a nivel municipal es proporcional a su tamaño de población, por lo que el coeficiente de correlación de $\rho=0.79$ ($p<0.001$) permite contar con un buen nivel de confianza en las estimaciones y pronósticos utilizando información exógena a los datos de ET, así como identificar más fácilmente las posibles desviaciones motivadas por causas exógenas a la dinámica del fenómeno.

En la Figura 4.13 cada círculo refiere a un municipio con defunciones de peatones en 2018, 719 en total, la escala logarítmica sirve para mostrar la distribución en los porcentajes bajos de concentración de población y de defunciones, lo que permite observar cómo se agrupan los municipios con menor densidad de habitantes y, al mismo tiempo, la estrecha relación entre ambas magnitudes. Como puede observarse, el crecimiento exponencial sobre la escala logarítmica indica que el porcentaje de peatones fallecidos por ET crece linealmente respecto al porcentaje de población contenida en el municipio.

Figura 4.154. Relación entre *tamaño de población y defunciones de peatones*, municipal 1998-2018

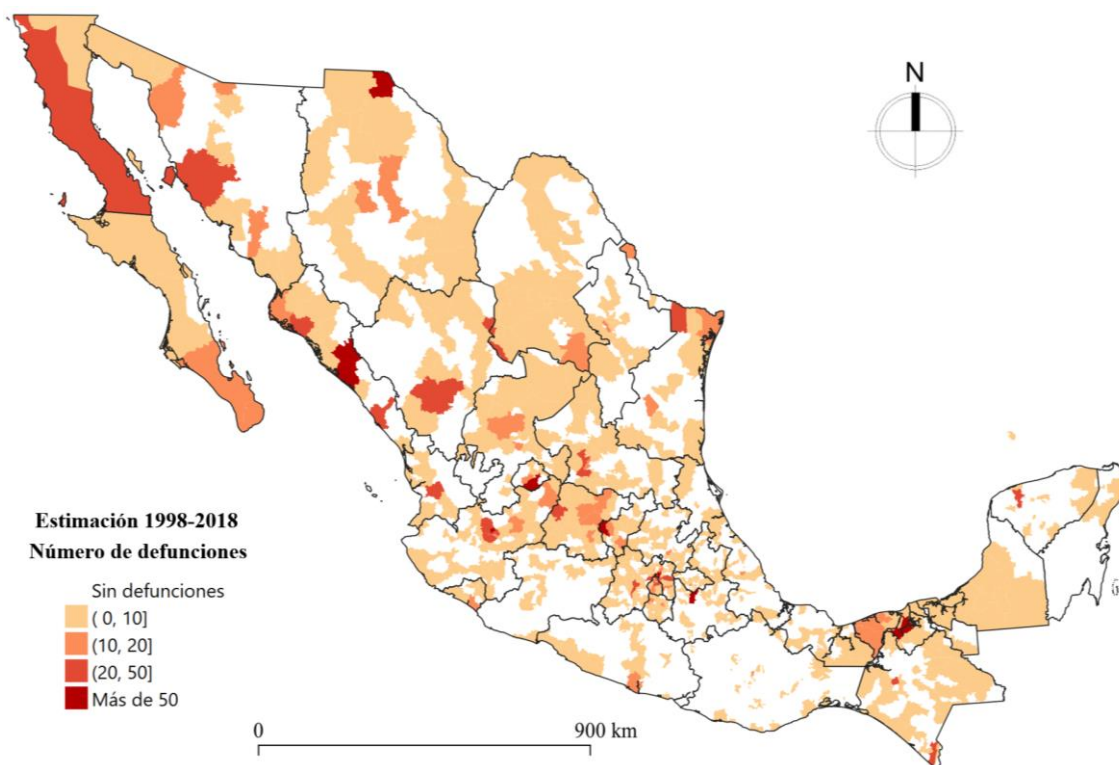


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para aproximarse a la distribución de las defunciones en el territorio y mostrar los resultados de la mortalidad en peatones a escala territorial, en el Mapa 4.2 se muestran los municipios en los cuales hubo registros de este tipo en 2018, como se ha dicho, los municipios con defunciones coinciden con aquellos con mayor tamaño de población, fenómeno que también se observa a lo largo del tiempo.

Desde luego, para conocer el impacto en la población general y comparar la mortalidad de esta causa con las demás que afectan a las dinámicas demográficas, es necesario proyectar las tasas que se espera ocurran en los siguientes años. De la misma manera que los demás ejercicios de pronóstico, este ejercicio considera las proyecciones de CONAPO sobre el crecimiento y composición de la población en los siguientes años.

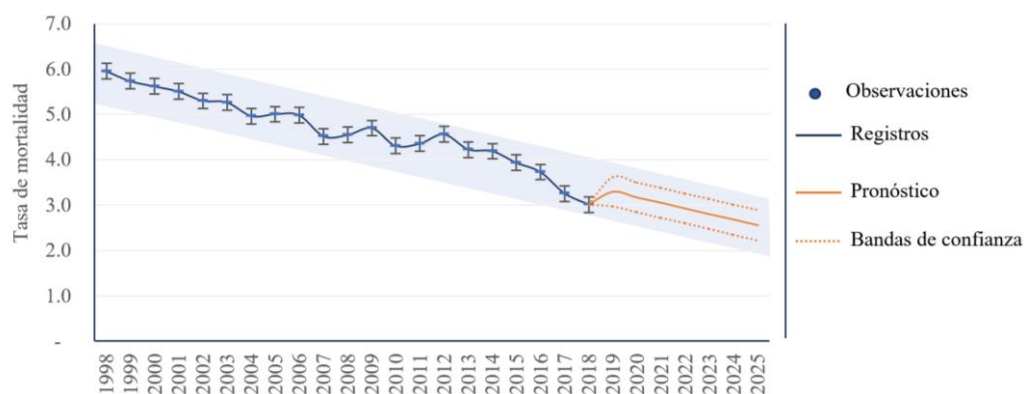
Mapa 4.155. Número de defunciones en 2018 a nivel municipal.



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En este sentido, resulta notable que la tasa observada en 1998, de 5.8 defunciones por cada 100,000 habitantes, haya disminuido hasta 2.9 en 2018, por lo que se espera que alcance el valor de 2.4 en 2025, lo que implica una reducción de 58% respecto a 1998, una variación significativa pero que, durante el periodo del DASV 2010-2020, apenas alcanza a acumular 27%, incumpliendo las metas previstas en el ODS-3.

Figura 4.156. Evolución y proyección de la *tasa de mortalidad de peatones* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

4.2 Riesgos competitivos

Para estudiar la *latencia de los riesgos* asociados a las discordancias de tránsito, en esta sección se plantea una analogía ecológica basada en el concepto de *entes competidores*, lo que permite modelar a las diversas fuerzas que producen los ET como una *familia de riesgos con tipos distintos de eventos*. De este modo, las entidades denominadas riesgos compiten entre sí para realizarse en cada oportunidad de ocurrencia de un evento de tránsito. La primer hipótesis en este modelo es que, durante el tiempo en que se materializa uno de los riesgos, puede ocurrir uno, y solo uno, de los múltiples tipos admitidos en la familia, siendo el tipo asociado con la mayor severidad, el elegido para la imputación del tipo de evento en el registro final.

Desde luego, al considerar diferentes tipos de realizaciones, se aumenta la complejidad de los modelos, lo cual se debe no solo al manejo de las variables, sino también al planteamiento de la ocurrencia de una de las múltiples amenazas medidas, las cuales, al ser magnificadas socialmente mediante las conductas individuales de las personas y los colectivos, modifican dinámicamente sus niveles de exposición y vulnerabilidad, alterando la intensidad de los riesgos y las observaciones sobre su impacto. En este sentido, la aversión al riesgo es un componente intrínseco que hipotéticamente modula la exposición o evasión de los riesgos, por lo que cada uno de éstos ocurrirá tan frecuentemente como lo provoquen las discordancias de tránsito, las cuales poseen localización espacial y temporal.

A partir de lo anterior y como no todas las personas son igualmente vulnerables a los mismos riesgos —ni ante su ocurrencia se detonan las mismas consecuencias—, el análisis de las variables demográficas, como edad, sexo, tipo de usuario de transporte y una amplia gama de FA, podrían brindar información valiosa acerca de la dinámica de los distintos tipos de eventos y cómo estos afectan a los diversos grupos poblacionales. Aunque en los análisis posteriores se llevan a cabo con diversas variables, no es de ninguna manera en un sentido exhaustivo, ya que el foco reside principalmente en los modelos conceptuales e instrumentales.

Así, aunque un ET puede ser clasificado en diferentes categorías tales como *atropellamiento, colisiones, volcaduras, caídas de pasajero, derrapamiento* y muchos otros, la incidencia de más de un tipo de amenazas también puede concentrarse en los distintos grados de vulnerabilidad de los usuarios durante el tránsito, como podría ser *Peatón, Ciclista, Motociclista, Ocupante de vehículo, automóvil, camioneta o furgoneta, vehículo de transporte pesado, de autobús u otros*, todos ellos dependientes de diversos aspectos socioeconómicos asociados con el sexo, el grupo etario y las necesidades de desplazamiento, provocando que todas ellas sean susceptibles de modelarse desde un marco estocástico mediante funciones de distribución de probabilidades como las que se desarrollan a continuación.

Hasta este punto, se ha trabajado sobre un escenario dialéctico. Por un lado, a los involucrados se les ha dado un tratamiento que distingue entre víctimas y sobrevivientes; por el otro, se ha considerado al *riesgo de verse involucrado en un ET* como un ‘ente con fuerza propia’. Con la intención de hacer más robusto el modelo y al mismo tiempo hacerlo más flexible, se amplía el modelo a una colección de riesgos en *competencia*. Dado que el objetivo central es ampliar el modelo en el que los diferentes riesgos de tránsito ‘compiten’ por realizarse en cada uno de los individuos de la población expuesta, el marco de estudio para los ET considera al fenómeno desde un enfoque de realizaciones individuales aleatorias regidas por leyes de distribución, las cuales regulan las características de los involucrados y permite distinguir grupos de población en términos de su exposición al riesgo, permitiendo medir las probabilidades de ocurrencia, tanto espacial como temporalmente, lo que amplía las posibilidades de comprender el estado actual y probable evolución del fenómeno.

Hasta los albores del siglo el siglo XIX, los *riesgos competitivos (RC)* se reconocieron en diversos contextos como un caso particular del análisis del tiempo. Ocasionalmente, pero con poca frecuencia, también se han publicado estudios e investigaciones que incorporan nuevos desarrollos en este tema dentro del área de la estadística matemática. No obstante, a medida que los datos de diversos fenómenos y su capacidad de procesamiento se han vuelto más extensos, claros, precisos y exhaustivos, el análisis y la modelación de los RC se ha ido convirtiendo en una forma dinámica para analizar el tiempo que transcurre hasta la ocurrencia de un evento de interés.

Desde luego, para lograr un modelo robusto, es necesario establecer la conexión entre los resultados matemáticos y la ocurrencia desde la mirada y terminología del fenómeno en estudio. En múltiples momentos, diversos autores han contribuido a la comprensión de las situaciones de RC (Varadhan, R., 2010; Freidlin B, Korn, 2005) mejorando y desarrollando técnicas, procedimientos, procesos y códigos de programación, con el fin de abordar fenómenos que se corresponden con los RC (Pintilie M.; Zhou, B., 2010).

Aunque no es imprescindible, ni tampoco una regla de investigación, también es frecuente que los estudios de RC muestren resultados longitudinales, lo que permite observar a cada sujeto de la cohorte durante un período de tiempo hasta que ocurre el evento de interés, que en el caso de los ET puede ser la muerte, por lo cual la estimación de las probabilidades de ocurrencia del evento conlleva la asociación con covariables relacionadas con las características del sujeto, los factores asociados y las características asociadas a los componentes de la trilogía vial ya mencionada en el capítulo 1.

Respecto al análisis estadístico, a pesar de que las pruebas estadísticas son similares al análisis de supervivencia expuesto en el capítulo 3, el método más habitual para estimar la probabilidad de un ET, o de una defunción por ET, se basa en enfoques no paramétricos, como el denominado Kaplan-

Meier (Pintilie, M., 2011), o método de límite de producto. Ante esta generalización, uno de los cambios más importantes para modelar los ET reside en los ajustes que es necesario llevar a cabo en las ecuaciones cuando se usa el supuesto principal de la estimación del tiempo de supervivencia, que señala:

‘si se espera un tiempo suficiente, todos los componentes vivos experimentarán su fin’

Lo que es absolutamente cierto para los humanos, pero a la luz de los ET puede no cumplirse ya que, como no toda defunción ocurre por un ET, existe un conjunto de personas que, aun viviendo un tiempo infinito, existe una probabilidad positiva de no experimentar nunca un ET, por lo que es necesario proponer que la familia de ‘todos los otros riesgos’ representan a un gran riesgo que también compite con los ET.

De acuerdo con Miyasaka et al. (Miyasaka, Y., 2007), en una situación de RC la ocurrencia de un tipo de evento cambia la capacidad de observar el evento de interés, lo que precisa ajustes en las funciones de distribución de cada riesgo e impacta en otros formalismos matemáticos relacionados con el manejo de las distribuciones truncadas en las que la integración de algunas ‘funciones de probabilidad’ sobre todo el espacio de medida, no converge a 1, es decir, no integran un 100% bajo la curva de densidad propuesta (Hoffmann, M., & Vetter, M., 2017).

A partir de estas consideraciones, en esta sección se presentan las definiciones y ecuaciones que permiten estudiar desde un marco estocástico a los diversos riesgos que ‘compiten para la realización de un evento particular’ y que culminan en una defunción por ET. En esta extensión del modelo, las variables aleatorias utilizadas son la familia $\{T_{\alpha_t}(\varepsilon)\}$ para $\alpha, t > 0$, que refieren al tiempo de latencia hasta la realización de alguno de los riesgos que compiten por materializarse sobre la persona de edad α , a partir del tiempo t .

De este modo, los posibles r riesgos son ordenados y etiquetados de acuerdo con su magnitud con $1, 2, 3, \dots, r$ y son representados por la VA $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, cuya naturaleza es discreta. En este punto interesa presentar la teoría para estudiar la distribución de las variables aleatoria $T_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ con respecto a una sola ocurrencia. También se presentan los elementos que integran una tabla de riesgos múltiples, así como su construcción, ya sea a partir de probabilidades de realización del riesgo —procesos de ocurrencia—, o bien, a través de las tasas absolutas y relativas —procesos de frecuencia— relacionadas con la intensidad del riesgo —procesos de severidad—.

Desde luego, al ampliar la gama de riesgos, se pretende modelar las múltiples amenazas postulando que ‘cada una de ellas ocurrirá tan frecuentemente como sea posible’, aunque no todas las personas

sean igualmente vulnerables, ni se expongan de la misma manera a ellas. Como el planteamiento de riesgos competitivos es un modelo matemático que considera un grupo de personas suficientemente grande, sujeto a diversos tipos de discordancia que se realizan continuamente y que culminan en un ET, para comprender mejor los valores de la frecuencia de $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$, se requiere desagregar en los múltiples tipos de eventos que lo conforman, lo cual se establece mediante la notación de la siguiente definición.

Definición 4.80. El riesgo $\mathcal{R}_t(\varepsilon)$ que origina las $\mathcal{D}_t(\varepsilon)$ entre la población $\Pi_t(\varepsilon)$ posee r expresiones distintas, denominadas tipos de ET, a partir de los cuales se conforma la variable de frecuencia de ET, $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$, en un espacio acotado ε y tiempo dado t . Aunque los r tipos de ET compiten entre sí, para un ET, uno y solo uno puede expresarse en cada consecuencia.

Esta definición es sumamente relevante porque el grupo de miembros considerado en $\Pi_t(\varepsilon)$ constituye una población con las mismas características ya establecidas, adicionalmente, es de mucha utilidad si se tiene evidencias de que ésta es débilmente estacionaria³⁰ y es posible asumir ciertas hipótesis de regularidad estadística sobre la evolución de las cohortes, para la cual se dan las siguientes definiciones.

Definición 4.81. El número de involucrados en ET por todas las causas está dado por $\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon) = \mathbb{I}_t(\varepsilon)$ es la suma del número de personas involucradas en todos los r tipos de ET, es decir

$$\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon) = \sum_{i=1}^r \mathbb{I}_t^{(i)}(\varepsilon) \quad (4.11)$$

Definición 4.82. Al número de personas involucradas en un ET del tipo r en el espacio ε y en el tiempo t , se denota por $\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon)$, una VA que a su vez se descompone como la suma de dos variables aleatorias complementarias: número de personas que permanecieron vivas después del ET, denotado por $\mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon)$ y número de defunciones $\mathcal{D}_t^{(r)}(\varepsilon)$, por lo que al materializarse un ET de tipo r , siempre se cumple lo siguiente:

$$\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon) = \mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{D}_t^{(r)}(\varepsilon) \quad (4.12)$$

cuya esperanza matemática $E[\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon)] = \mathbb{i}_t^{(r)}(\varepsilon)$, está dada por

$$E[\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon)] = \mathbb{i}_t^{(r)}(\varepsilon) = E[\mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{D}_t^{(r)}(\varepsilon)] = E[\mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon)] + E[\mathcal{D}_t^{(r)}(\varepsilon)] = \mathcal{v}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{d}_t^{(r)}(\varepsilon) \quad (4.13)$$

Además, el número $\mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon)$, que es una VA, puede a su vez descomponerse en no heridos y heridos, tal que $\mathcal{V}_t^{(r)}(\varepsilon) = \mathcal{U}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{H}_t^{(r)}(\varepsilon)$, lo que supone la ecuación general:

³⁰ Se dice que un proceso estocástico es estacionario si la distribución de probabilidades de cada una de las VA que lo componen no cambia a lo largo del tiempo.

$$E \left[\mathbb{I}_t^{(r)}(\varepsilon) \right] = \mathbb{i}_t^{(r)}(\varepsilon) = E \left[\mathcal{U}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{H}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{D}_t^{(r)}(\varepsilon) \right] = \mathcal{u}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{h}_t^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{d}_t^{(r)}(\varepsilon) \quad (4.14)$$

Definición 4.83. El número de involucrados en un ET de tipo r , a la edad α de la cohorte $\Pi_0(\varepsilon, t)$, son todas las personas que a edad α en el tiempo $(t + \alpha)$ han participado en un ET de tipo r , lo que se denota mediante $\mathbb{I}_\alpha^{(r)}(\varepsilon, t + \alpha)$.

Desde luego, varias de las propiedades obtenidas a partir de la definición 4.5 se heredan a los grupos de edad, por ejemplo:

$$\mathbb{I}_{\alpha t + \alpha}^{(r)}(\varepsilon) = \mathcal{V}_{\alpha t + \alpha}^{(r)}(\varepsilon) + \mathcal{D}_{\alpha t + \alpha}^{(r)}(\varepsilon) \quad (4.15)$$

Como se ha mostrado anteriormente, para poder emplear las ecuaciones desarrolladas, es necesario que la desagregación en grupos sea siempre una partición de las subpoblaciones, que en el caso mexicano puede corresponder a las categorías: *conductor*, *ocupante* —en una sola categoría o especificando el vehículo³¹—y *peatón*, a lo que se puede agregar la categoría *Otros no identificados* como un procedimiento de complementariedad que asegure la partición en todo momento³².

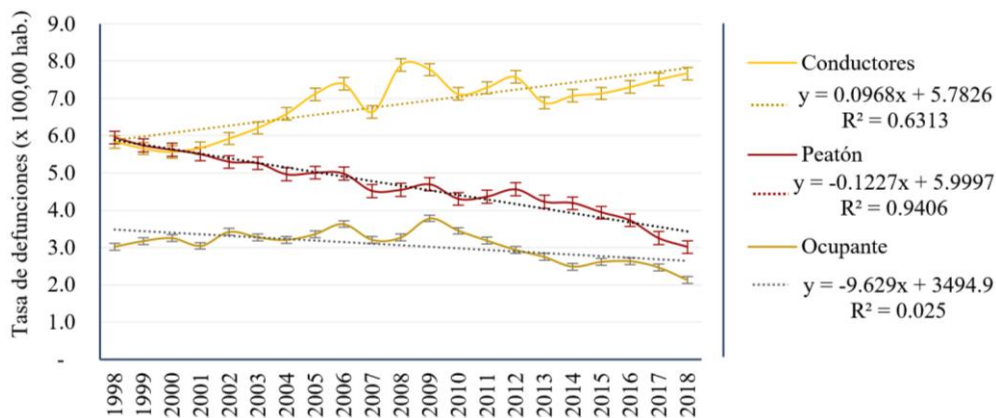
Así, al separar las magnitudes asociadas a las defunciones entre conductores, ocupantes y peatones, se puede entender mejor las amplias divergencias y enfoques de las afirmaciones vertidas en distintos titulares de las noticias cuando, por ejemplo, se señala que el riesgo de fallecer por un ET se ha vuelto menor o mayor con el paso del tiempo, o que el gobierno tiene logros significativos en este grave problema de salud pública, ya que estas opiniones demandan mayor precisión respecto al grupo, espacio y periodo en referido.

En la Figura 4.15 se muestran las tasas de mortalidad en cada grupo por cada 100,000 habitantes. La agregación de las tasas a un valor nacional lleva a 14.8 defunciones por cada 100,000 habitantes en 1998, lo que se reduce a 12.8 en 2018. Si bien es importante que se reduzcan las tasa de fatalidades en todos los casos, los dos puntos porcentuales observados apenas se traducen en una variación de -13.5% en las defunciones, lo que no representa mayor hito y se encuentra bastante lejos de alcanzar las metas previstas para 2020 y los objetivos globales.

³¹ *Motociclista* (V20-V29), *Ocupante de vehículo de motor de tres ruedas*, (V30-V39), *Ocupante de automóvil* (V40-V49), *Ocupante de camioneta o furgoneta* (V50-V59), *Ocupante de vehículo de transporte pesado* (V60-V69), *Ocupante de autobús* (V70-V79).

³² Es valioso mencionar que la integridad de los levantamientos en México aún es un tema pendiente y que es frecuente que, tanto las categorías, las codificaciones e incluso los diccionarios de datos cambien sustancialmente a lo largo de los años sin considerar las metodologías y buenas prácticas que permiten la comparabilidad de las series.

Figura 4.157. Evolución de las *tasas de mortalidad por tipo de usuario*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse en las tres líneas de la gráfica, las defunciones totales por ET tienen fuentes mixtas que no van en la misma dirección de cambio. Por un lado, se ha logrado reducir las defunciones de peatones en 49.5%: de 6 a 3 por cada 100,000 habitantes, lo que puede tener múltiples fuentes de explicación.

Respecto a los ocupantes de vehículo, la tasa en 1998 fue de 3.0 ocupantes de vehículo fallecidos por cada 100,000 habitantes y en 2018 el valor es de 2.1, lo que representa una variación de -29.3%. Esta importante disminución puede deberse a múltiples esfuerzo colectivos, entre ellos, los de algunas áreas del sector automovilístico y de transporte que se han dado a la tarea de diseñar sistemas y regulaciones que ayuden a preservar la vida de los ocupantes.

Por su parte, la seguridad en los conductores está lejos de poder afirma que ha evolucionado positivamente, debido a que el número de las defunciones no solo no ha disminuido, sino que continúa creciendo sostenidamente, pasando de 5.8 a 7.7 defunciones por cada 100,000 habitantes, un aumento de 31.4%.

Un aspecto crucial para modular los niveles de exposición es la vulnerabilidad, es que la mayoría de los usuarios de la vía desconocen la información sobre la magnitud de los ET y sus enormes consecuencias en la salud y la vida. Además, la asociación entre los ET severos y la percepción subjetiva del riesgo también es un elemento desconocido que influye en la justificación de actitudes de riesgo (Sánchez, F., 2008).

En este sentido, existen diversos estudios que señalan cómo las conductas de riesgo pueden ser justificadas para reducir el malestar interno y dar sintonía social, especialmente cuando se percibe que la conducta puede ser considerada irracional o inmoral por las demás personas (Sánchez, F., 2008;

Lima-Serrano, M., 2013), promoviendo la capacidad de inventar ideologías morales para justificar diversas conductas de riesgo y disminuyendo internamente el autocuidado, aumentando la vulnerabilidad en la toma de decisiones, lo que se ha documentado ampliamente en las situaciones relacionadas con la movilidad, especialmente en las personas con responsabilidad al volante que han producido defunciones (Neto; Iglesias; Günther, 2012), lo que se puede estudiar a través del siguiente concepto.

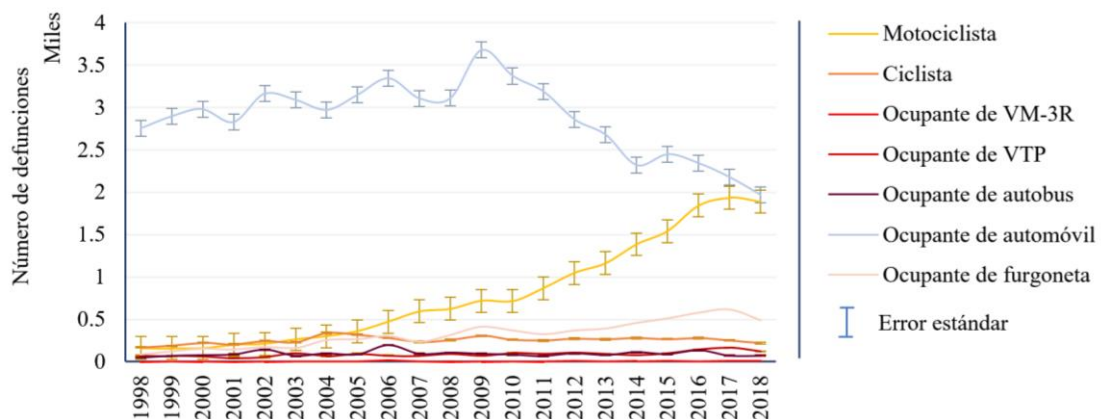
Definición 4.84. El número de involucrados en ET del tipo r entre las edades α y $(\alpha + n)$ está dado por ${}_n\Pi_{\alpha}^{(r)}$ y ${}_nq_{\alpha}^{(r)}$ denota la probabilidad de que (α) fallezca en un ET del tipo r entre las edades x y $x + n$, por lo que

$${}_nq_{\alpha}^{(r)} = \frac{{}_n d_{\alpha}^{(r)}}{\Pi_{\alpha}(\varepsilon)} \quad (4.16)$$

Ante la extensión de la notación, se seguirá manteniendo la convención de que cuando $n=1$, no será necesario escribir el subíndice antecesor. De este modo, las VA que intervienen en el modelo de riesgos competidores son: $\mathcal{T}_{\alpha}(\varepsilon)$, el cual denota el tiempo futuro de una persona en edad α al tiempo t . Por su parte, $\mathcal{R}_{\alpha}(\varepsilon)$ es una VA discreta que denota el tipo de ET que ha provocado la defunción de una persona con edad α , con $\mathcal{R}_{\alpha}(\varepsilon) = 1, 2, \dots, r$, donde r es el número total de riesgos reconocidos.

En la Figura 4.16 se muestra la evolución de las defunciones por tipo de usuario, en el periodo 1998-2018: *Motociclista*, *Ciclista* y los cuatro tipos de ocupante —de tres ruedas, en rojo; de automóvil, en azul, de camioneta o furgoneta, en rosa; de vehículo de transporte pesado; en rojo oscuro y de autobús, en bermellón—.

Figura 4.158. Evolución del número de defunciones por tipo de usuario, 1998-2018

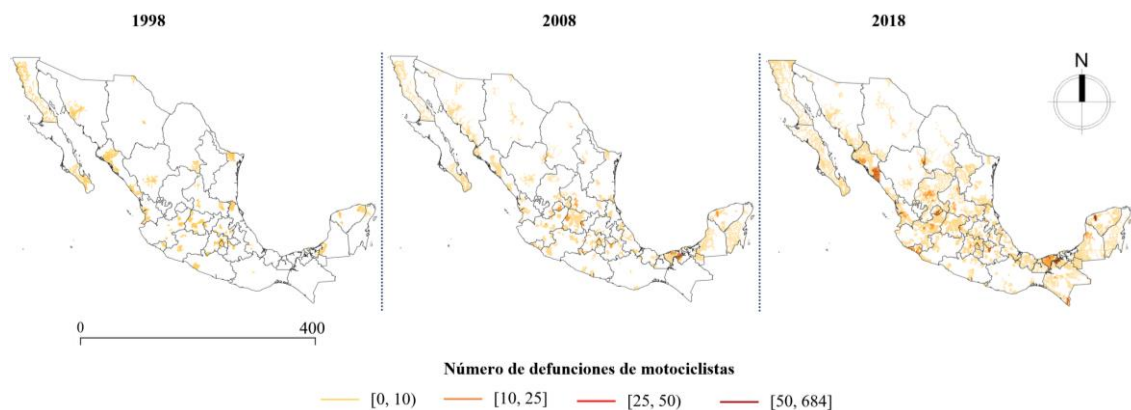


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, en 1998 los ocupantes de automóvil dominaban la situación con 2,752 defunciones, mientras que los demás grupos de conductores representaban muy pocos casos en términos relativos. Con el paso del tiempo y hasta 2009, los ocupantes de automóvil continuaron dominando en números absolutos y los demás grupos se mantuvieron alrededor de los mismos valores, excepto los motociclistas, que en 1998 sumaron 164 ET fatales, cifras que fueron ascendiendo gradualmente hasta 2005, año en el que las 360 defunciones representaron 120% de lo registrado en 1998 y en el cual comenzó una tendencia de crecimiento mucho más acelerada que más tarde alcanzó el número de 1,890 en 2016, 10 veces lo registrado en el año inicial de medición, igualando a los ocupantes de automóvil en el número de defunciones.

Para tener una perspectiva territorial de las víctimas en motocicleta con el paso del tiempo, en los Mapas 4.3a, 4.3b y 4.3c se muestra en color graduado la red carretera de los municipios que registraron defunciones de motociclistas en tres años distintos que se encuentran separados por una década: 1998, 2008 y 2018. Como puede observarse, el aumento de la frecuencia se expresa en la ampliación del territorio en donde ocurren este tipo de *ET-Fatal* —cobertura espacial del fenómeno, definido por ε — y en el incremento de la cantidad de eventos en las mismas demarcaciones —frecuencia del proceso, dado por $\mathcal{N}_t(\varepsilon)$ —, que es la forma dimensional en la que el proceso de riesgo magnifica su intensidad.

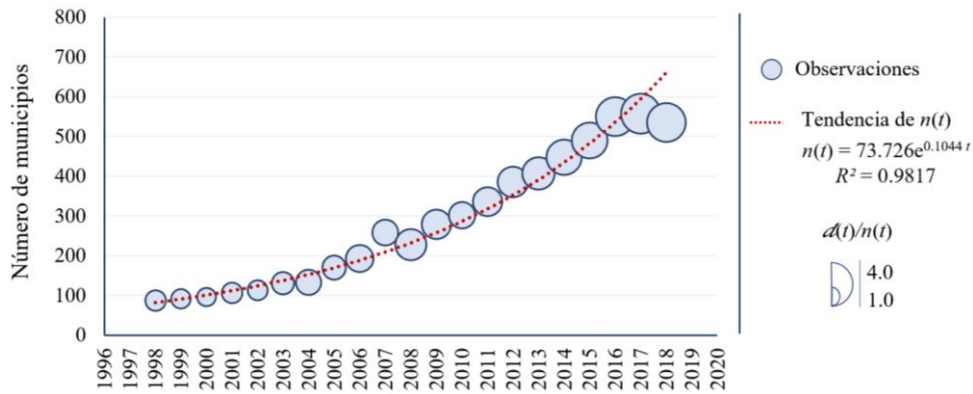
Mapas 4.159a, 4.3b y 4.3c. Número de defunciones de motociclistas en México, 1998, 2008 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De esta manera, el proceso de amplificación territorial medido en número de municipios está dado por $n(t)$ sobre el espacio ε mediante la ecuación exponencial $n(t) = 73.726 * \exp(0.1044 * t)$, cuya evolución se ve como en la Figura 4.17, que muestra el número municipios en el que se registran defunciones de motociclistas cada año y en el que los círculos son proporcionales al número de defunciones promedio anuales por municipio, dados por $\mathcal{d}(t)/n(t)$.

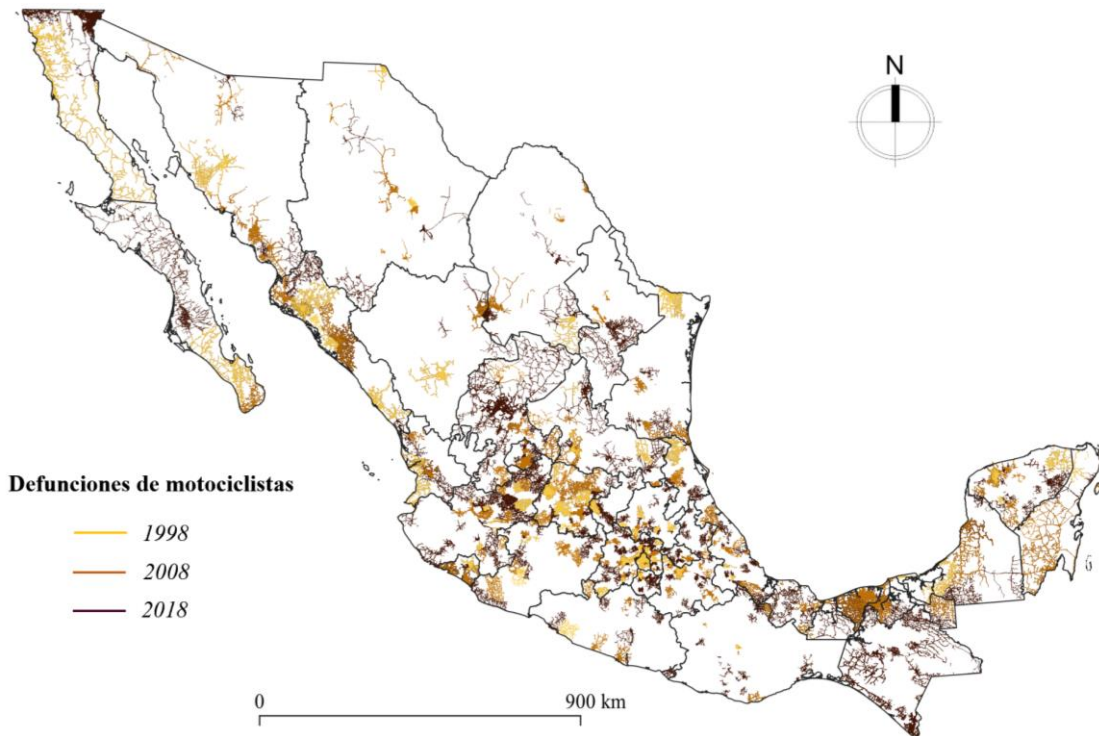
Figura 4.160. Evolución del número de *municipios con defunciones de motociclistas*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con el fin de observar la expansión del fenómeno de letalidad de los ET en los motociclistas a nivel municipal se presenta el Mapa 4.4, en el cual se observa la expansión en la mancha de defunciones que comienza en 1998 con 161 defunciones en 87 municipios, con una media de 1.9 defunciones en cada uno. Como puede verse, la tendencia es creciente para la mayoría de los años y en 2018 alcanza 1,828 muertes en 535 municipios distintos, promediando 3.4 defunciones, lo que implica un aumento de 1035% en la frecuencia y 85% en el promedio municipal, siendo los municipios urbanos los de mayor concentración de las fatalidades.

Mapa 4.161. Acumulación de las *defunciones de motociclistas* en el tiempo y el territorio.



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, existen múltiples preguntas alrededor de este incremento tan pronunciado que podrían motivar mayor investigación, lo que sugiere colocar en el centro de todas a aquellas que brinde explicaciones sobre la forma en que evolucionaron.

Hasta inicios de la década de los 90, las motocicletas dominaban como vehículos de ocio, sin embargo, su bajo costo y la posibilidad de evitar los problemas de congestión en la movilidad mediante una mayor agilidad en el desplazamiento la convirtieron en un vehículo de transporte cotidiano (Amorim et al., 2012). De acuerdo con un estudio de Vasconcellos (2008), dado su bajo costo de adquisición y mantenimiento, desde hace dos décadas se comenzó a observar el crecimiento del uso de la motocicleta como herramienta de transporte y trabajo.

Como se confirma en estos análisis, el aumento del número de motocicletas en circulación también se asocia con una mayor vulnerabilidad y exposición al riesgo de participar en un ET, tanto en el ámbito colectivo como en el individual, e incluso impacta la vulnerabilidad de otros tipos de usuario como ciclistas y peatones, pues existen diversos reportes de competencia entre ellos por el limitado porcentaje exclusivo en las vías y el espacio público en general (Andrade et al., 2009), lo que ha suscitado amplios cuestionamientos en la lógica y las decisiones sobre la gestión de los espacios destinados a la movilidad.

Otra fuente complementaria de explicación para este fenómeno de crecimiento desmesurado, puede basarse en que, frecuentemente, los vehículos de baja cilindrada suelen ser mucho más baratos porque no poseen equipos de seguridad instalados y garantizados de fábrica, como el control de tracción y frenos ABS —que ayudan a reducir derrapamientos y deslizamientos—, o un sistema de iluminación y visibilidad que ayude a enfrentar condiciones adversas, llantas con niveles de seguridad adecuados, etcétera (Braveman, 2014; Garrafa, 2005; Unesco, 2013), los cuales son adquiridos, en su mayoría, por personas con menor poder adquisitivo, lo que produce un dominio general de los mercados de venta y reventa de motocicletas de baja calidad³³.

Como diversos economistas han advertido (Akerlof, G. A., 1978; Huang, H., He, Y., & Chen, J., 2019); Leland, H. E., 1979), el peligro de provocar un mercado con estas características es enorme y trascienden el ámbito del bien o servicio en cuestión y fomentan el incumplimiento de las regulaciones mínimas de seguridad, incluso en los sectores formales. Por ejemplo, los mensajeros que se desplazan en motocicletas y los conductores de mototaxi no solo suelen ser los más susceptibles de sufrir un ET, sino también de ser peor atendidos ante la realización de un evento (Vasconcellos, E., 2013; Lam, C., 2019), debido primordialmente a una mayor exposición en las vías públicas que no es regulada

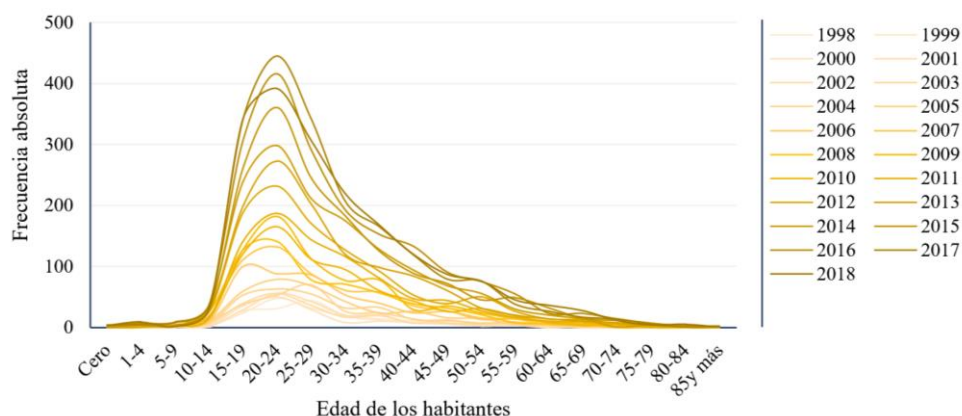
³³ Para una explicación más amplia, puede consultarse Akerlof (1978) y su intuitiva y acertada explicación sobre cómo se conforman un mercado de bienes de baja calidad.

adecuadamente y que frecuentemente carecen de cobertura en los sistemas tradicionales de seguridad social, motivada principalmente por la informalidad contractual y las condiciones socioeconómicas heredadas de las mismas actividades.

Sin embargo, como el estímulo sobre el que se estructuran las relaciones en este mercado descansa en maximizar las ganancias y minimizar los costos en todas las posibles aristas, incluso a costa de la seguridad y la vida misma, no existen suficientes incentivos para modificar la esencia ni la dinámica de vulnerabilidad de los motociclistas, como también muestran algunos estudios (Amorim et al., 2012; Vasconcellos, 2008).

Con el fin de entender quiénes son los más afectados con esta situación, en la Figura 4.18 se observa en color graduado la distribución anual de las defunciones de motociclistas por grupo etario para el periodo 1998-2018. Como puede verse, en cifras absolutas, el número de defunciones registradas hace dos décadas es bastante menor que lo observado en los años recientes. Es de interés hacer notar que la curva de distribución de frecuencias resulta similar a los registros de defunciones por todos los tipos de usuario, con el debido cambio de escala, lo que anteriormente se ha modelado bajo la hipótesis de una ley de distribución de Weibull.

Figura 4.162. Frecuencia absoluta de las *defunciones de motociclistas* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

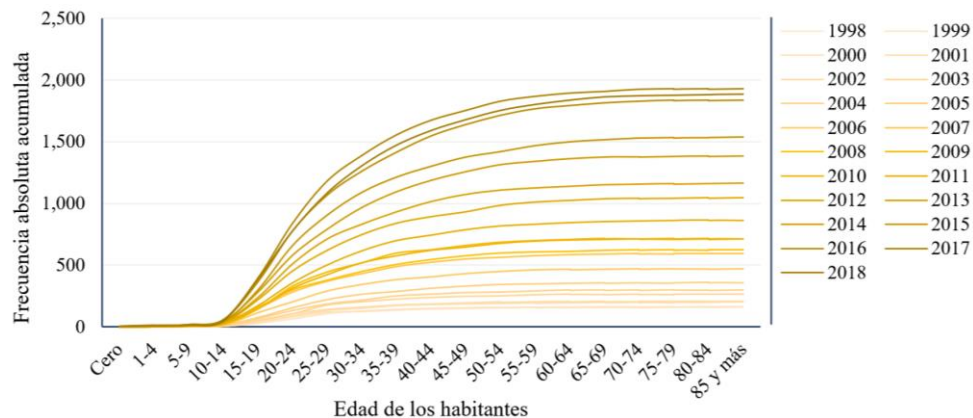
Como se ha realizado en múltiples oportunidades, conviene comparar la distribución acumulada de las defunciones en cada año con el fin de analizar el comportamiento de las frecuencias en forma más detallada.

En la Figura 4.19 se muestra la frecuencia acumulada de defunciones de motociclistas con el mismo color graduado de la figura anterior, el contraste señala claramente que el grupo etario que domina en

todos los años va de los 15 a los 44 años, una edad sumamente comprometedor en términos sociales, tanto por la etapa productiva, como por la expectativa de vida.

Asimismo, se observa que el crecimiento exponencial observado en la Figura 4.19 se repite en todas las edades en diferente magnitud, pero con las mismas propiedades cualitativas, un fenómeno que sugiere investigar el impacto de las alternativas de movilidad en las ciudades con mayores niveles de concentración poblacional.

Figura 4.163. Frecuencia acumulada de las *defunciones de motociclistas* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

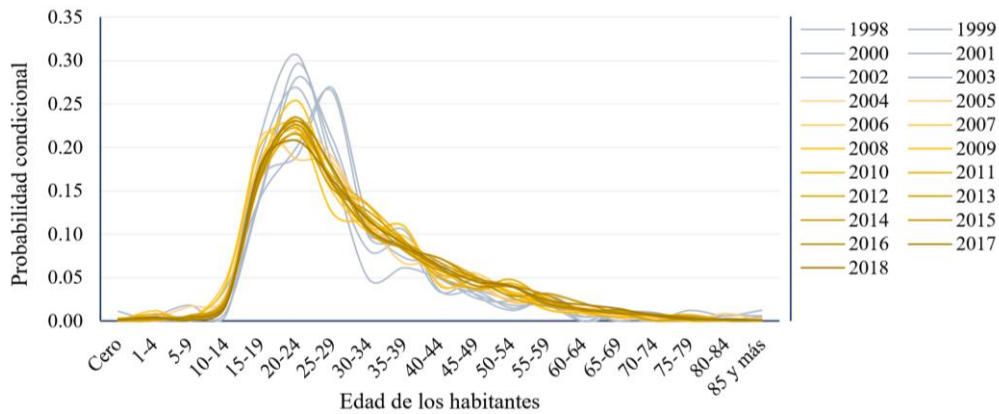
Otra característica que se aprecia visualmente al comparar los distintos años, es la posible invarianza de la distribución a lo largo del tiempo, es decir, el hecho de que las frecuencias relativas en cada grupo etario parecen mantenerse alrededor de los mismos porcentajes en todos los años, por lo que existe una duda razonable sobre la posibilidad de que la distribución de probabilidades, que distribuye probabilidades de defunciones anuales respecto a la edad, sea estacionaria.

Para averiguarlo, se obtuvieron las estimaciones condicionales de las probabilidades de que, dada una defunción por ET, esta ocurra en un motociclista de cierta edad. La Figura 4.20 muestra las estimaciones para el periodo 1998-2018 y señala que los años comprendidos entre 2004 y 2018 —en colores graduados entre amarillo y ocre—, las distribuciones son estadísticamente equivalentes, mientras que entre los años 1998 y 2003 —en azul celeste—, son cualitativamente distintas; lo que puede tener distintas explicaciones, incluyendo la falta de integridad de los datos.

Dada la clara dominación de la mortalidad por el grupo de jóvenes entre 15 y 44 años, tanto en la frecuencia relativa, como en el aumento proporcional a través del tiempo, una pregunta de interés reside en conocer si su evolución ha sido ascendente o descendente, para lo cual es necesario realizar dos análisis independientes y complementarios:

- 1) contrastar interanualmente las probabilidades condicionales, y
- 2) analizar la evolución de la intensidad de los riesgos relacionadas con las fuerzas de mortalidad.

Figura 4.164. Frecuencia relativa de las defunciones de motociclistas por grupo etario, 1998-2018



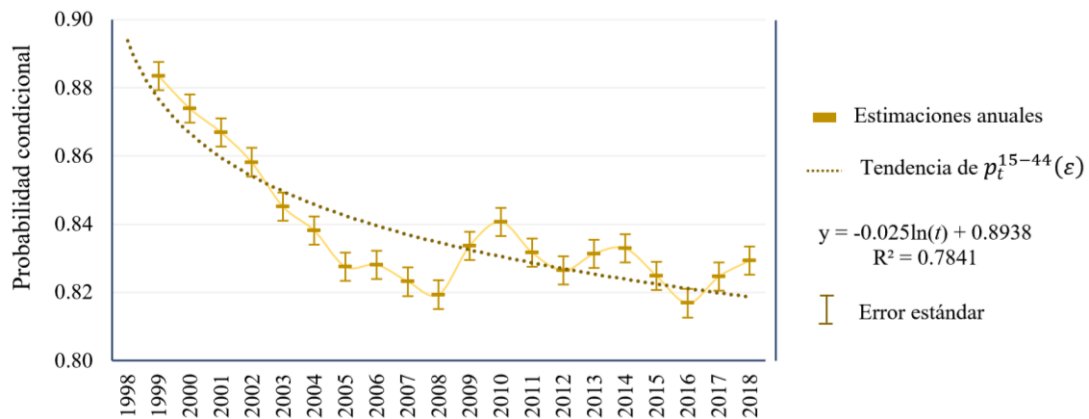
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para comenzar con el primer punto, se han realizado las estimaciones de probabilidad condicional: dada una defunción, que esta sea por un ET y que el involucrado sea un motociclista de cierta edad. Ya acotada la distribución marginal, después del procedimiento de escalamiento, puede estimarse la distribución de frecuencias por edad. Finalmente, es posible estimar las probabilidades de ocurrencia como un planteamiento binomial $Y_{i,t}(\varepsilon) \sim Bin(n_t^i(\varepsilon), p_t^i(\varepsilon))$, utilizando los procedimientos descritos en la ecuación 4.9, en donde $\pi_t^i(\varepsilon)$ refiere al número de defunciones de motociclistas que se ubican en el intervalo de edad [15,44], en el año t y el espacio ε , de tal forma que $p_t^i(\varepsilon) = p_t^{[15,44]}(\varepsilon)$ indica la probabilidad de observar la defunción en el grupo etario [15,44].

En la Figura 4.21 se muestran los resultados para la serie 1998-2018 con los errores estándar y la curva de regresión, la cual indica un ligero descenso en la probabilidad de que las defunciones de motociclistas se den en este grupo de edad. Como puede observarse, la ecuación de tipo exponencial confirma la disminución gradual ($R^2 = 0.7841, p < 0.001$)³⁴ y permite reconocer la tendencia con bastante nivel de confianza.

³⁴ El cual podría ser más alto si las oscilaciones entre los años fueran mejor atenuadas por el proceso de media móvil.

Figura 4.165. Evolución de las *defunciones de motociclistas* entre 15 y 44 años, 1998-2018

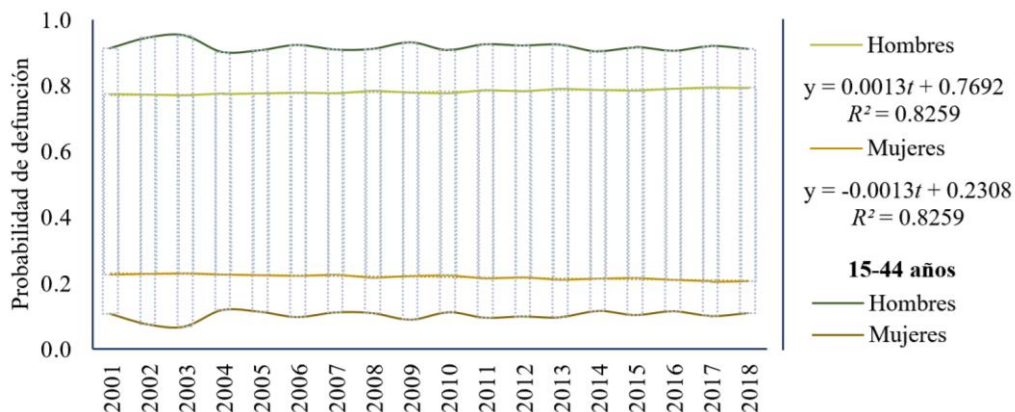


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, conviene abordar con una amplia perspectiva sobre el tamaño de las variaciones mostradas, ya que el 0.88 estimado en 1998 corresponde a 144 defunciones en este grupo etario del total reportado de 164; mientras que la estimación de 0.82 en 2018 corresponde a 1,547 defunciones de las 1,885 registradas, cuya diferencia en el orden de magnitud supone una amplificación mucho mayor.

Ahora bien, el enorme contingente de jóvenes que conducen motocicletas también es heterogéneo por lo que posee diversas asimetrías, entre ellas, una que resulta muy relevante es el sexo de los conductores y su relación con las actividades relacionadas, lo que se expresa en distintos niveles de exposición y vulnerabilidad, algo que se registra claramente en la distribución de las probabilidades asociadas a las defunciones a lo largo del tiempo.

Figura 4.166. Evolución de las *defunciones de motociclistas* por sexo, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 4.22 se muestra cómo los motociclistas hombres son mucho más vulnerables en todos los años, siendo la oportunidad relativa promedio de defunción de 0.79 para los hombres y de 0.21 para las mujeres, brecha que además se ha ido incrementando con el paso del tiempo a una tasa de cambio en la probabilidad de 0.0013 por cada año ($R^2 = 0.8259, p < 0.001$), como puede verse en las ecuaciones de las series de tiempo.

Otro rasgo de la predominancia de los hombres en la Figura 4.22 se observa en las brechas entre las probabilidades para cada sexo cuando solo se considera a las defunciones de personas entre 15 y 44 años, siendo $p_t^{[15,44]}(\varepsilon; \text{Hombres}) = 0.91$ y $p_t^{[15,44]}(\varepsilon; \text{Mujeres}) = 0.09$, lo que coincide con distintos estudios relacionados con la creciente exposición y vulnerabilidad de los motociclistas urbanos (Vasconcellos, 2008).

Los resultados anteriores sugieren la necesidad de diferenciar los conceptos de susceptibilidad y vulnerabilidad y su efecto en los ET y sus consecuencias. Dado que una persona ‘susceptible’ es un individuo en situación de desventaja que lo predispone al daño o sufrimiento humano (Kottow, 2003, 2011), desde esta definición, atribuir al conductor la responsabilidad exclusiva de los ET carece de sentido (Silva, 2003), ya que la vulnerabilidad inherente al ser humano es condicional a los factores culturales, económicos y sociales imperantes en los modelos de transporte y las medidas disponibles para aminorar el riesgo de un *ET-Fatal* (Brasil, 2008; Vieira, 2011; Zerbini et al., 2009), razonamiento que sería deseable aplicar con énfasis especial a los motociclistas.

Es importante señalar que, a pesar de la enorme visibilidad del fenómeno y sus fatales consecuencias diarias, el número de motocicletas que se encuentran circulando en las grandes ciudades de México es impreciso, así como los atributos que se asocian a los conductores, especialmente en lo que atañe a los servicios. Al respecto, Diniz (2006) menciona: ‘todos odian a los mensajeros en motocicleta, excepto cuando los necesitan’, lo que se ve reflejado en la aversión y falta de consideración hacia este grupo, aumentando el riesgo de la actividad y que, según las evidencias, continuará creciendo en un entorno de desregulación de los servicios asociados con el consumo que dependen del reparto y traslado, especialmente en las grandes ciudades y todas sus zonas urbanas (Vasconcellos, 2008).

La diversidad de factores sociales, económicos y culturales que determinan la inseguridad derivada de la circulación de las motocicletas rebasa por mucho al ámbito de la geografía y la salud, debido principalmente a la subjetividad prevalente en las múltiples aristas que demandan su registro y estudio (Silva, 2003). Desde una visión más amplia, las cifras expuestas en la Figura 4.22 pueden estar directamente relacionadas con la vulnerabilidad social de los difuntos, ya que es altamente probable que la elección de la motocicleta como medio de transporte se relacione con sus condiciones socioeconómicas y un conjunto de actividades que vuelven más frágil al motociclista ante la movilidad

y lo hace susceptible a mayores daños durante las jornadas de tránsito, lo que no solo aumenta la frecuencia de los eventos, sino su letalidad.

Por ejemplo, en un estudio realizado por el Instituto de Investigaciones Económicas Aplicadas (IPEA) de Brasil se informa que 'el 71% de las personas lesionadas en ET de motocicleta necesitan atención hospitalaria, en contraste con otros medios de transporte en donde es de apenas 7% (Vasconcellos, E., 2013). En este sentido, se vuelve visible la irresponsabilidad de los poderes públicos en la aceptación irrestricta de las motocicletas como medio de transporte, lo que casi siempre ocurre con el argumento de que los ciudadanos de bajo poder adquisitivo, es decir, grupos sociales vulnerables, finalmente tendrían acceso a los vehículos de motor, sin valorar las consecuencias y el efecto en profundizar su vulnerabilidad en el ámbito financiero y de salud al permitir y promover la adquisición de un estatus como 'conductor con altas probabilidades de daño' mediante elementos adicionales de exposición al peligro (Vasconcellos, 2008).

De este modo, al reconocer que en los derechos de cada ciudadano el Estado tiene el compromiso de proteger la vida ante cualquier situación que potencie el riesgo de daño (Schramm et al., 2005), y que el desarrollo social debe ser el objetivo principal de cualquier gobierno democrático (Garrafa, 2012), la vulnerabilidad ante el uso de la motocicleta exige la implementación de programas de intervención que abarquen dimensiones económicas, culturales y políticas, a través de la interseccionalidad, para llegar efectivamente a todos los actores involucrados en la dinámica de las defunciones de los motociclistas (Cunha; Garrafa, 2016).

En algunos ámbitos de la salud pública, el tema de la vulnerabilidad social sobrepasa el carácter individualizador del concepto de riesgo y aparece como un conjunto colectivo que conduce a 'la susceptibilidad de daño a la salud' (Muñoz Sánchez; Bertolozzi, 2007). Mediante este abordaje, los efectos nocivos relacionados con la pobreza socioeconómica que caracteriza las situaciones de violencia se pueden ver potenciados por la desigualdad relacionada con el sexo, la raza, la etnia, la región geográfica y los intergrupos, como los motociclistas (Braveman, 2014; Garrafa, 2012).

Como la desigualdad económica y la vulnerabilidad social están estrechamente relacionadas con el aumento en la exposición, las condiciones de vida motivan la carencia de los elementos necesarios para abatir la severidad de las consecuencias que son producto de una deficiente gestión del riesgo, por lo que las ocurrencias y su impacto potencian las condiciones marginales de la fragilidad humana (Corgozinho; Oliveira, 2016).

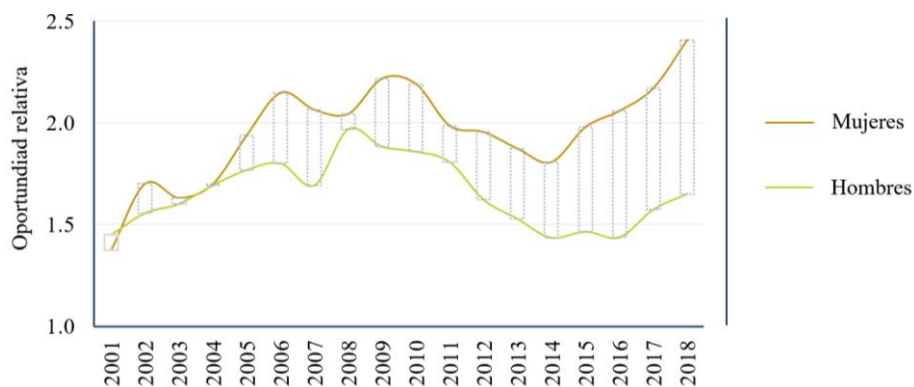
Dado que la vulnerabilidad social interfiere con la capacidad de autodeterminación y cuidado de las personas, esta clase de vulnerabilidad ante el tránsito contribuye significativamente a la exposición de

los motociclistas a una mayor variedad de riesgos en distintas ventanas del tiempo y el espacio, aún en condiciones informadas. Por ello, los niveles de fragilidad en el que se encuentra una gran proporción de los usuarios de motocicletas son, en sí mismos, determinantes sociales que predisponen a la muerte y la discapacidad, a saber: bajos ingresos y escolaridad; uso de motocicletas como medio de trabajo y transporte muy económico; motocicletas de baja cilindrada, en mal estado, con ausencia de dispositivos de seguridad o en condiciones de mínimo desempeño (Sohadi, R., 2005; Solagberu, B., 2006; Nguyen-Phuoc, D., 2019).

Ahora bien, como se ha señalado en diversas ocasiones, algunos individuos son más vulnerables que otros y, por lo tanto, son susceptibles de mayor daño ante variaciones en su exposición manteniendo el mismo tipo de vehículo (Cunha; Garrafa, 2016). Por ello, las situaciones y condiciones en que se dan los ET, y su estudio mediante la agrupación por tipo de vehículo, profundizan la identificación de las condiciones sociales de vida, tales como: trabajo, género, estatus socioeconómico y escolaridad, entre otros factores asociados (Almeida, 2010), ya que, en situaciones desfavorables, estas circunstancias aumentan la vulnerabilidad a la integridad del ser humano, haciéndolo susceptible de un mayor riesgo (Kottow, 2003, 2004, 2011).

Para analizar la evolución del proceso de vulnerabilidad, se han estimado las oportunidades relativas de las defunciones registradas por sexo de los involucrados y distinguido entre *leve* y *fuertemente* vulnerables. En la Figura 4.23 se muestran ambas series para el periodo 2001-2018.

Figura 4.167. Evolución de la OR entre fuerte y levemente vulnerables, 1998-2018

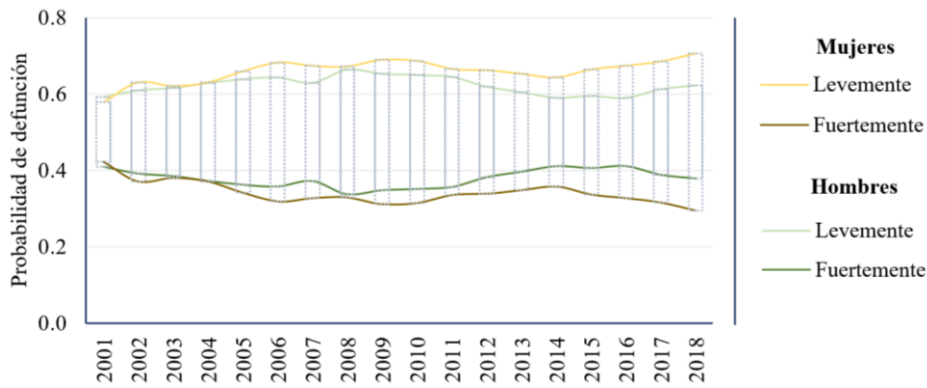


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, al inicio de la serie, los valores coinciden estadísticamente en una media de 1.41 defunciones de involucrados levemente/fuertemente vulnerables, no obstante, con el paso del tiempo, la divergencia del cociente de las probabilidades se hace mayor, siendo las mujeres el grupo que más aumenta la relación (75%) —en los hombres esta relación varió apenas 14%—.

Es así como la probabilidad condicional de observar defunciones de personas fuertemente vulnerables pasó de $p_{2001}^{Total} = 0.41$ en 2001 a $p_{2018}^{Total} = 0.36$ en 2018; sin embargo, esta disminución de 5 puntos (-12.2%) se distribuyó asimétricamente: en los hombres pasó de $p_{2001}^{Hombres} = 0.41$ a $p_{2018}^{Hombres} = 0.38$ — una disminución de 7.5%—, mientras que en las mujeres $p_{2001}^{Mujeres} = 0.42$ y $p_{2018}^{Mujeres} = 0.29$, lo que se traduce en una disminución de -30.3% en las probabilidades de que las mujeres fuertemente vulnerables fallezcan en un ET.

Figura 4.168. Evolución de las defunciones de los *leve y fuertemente vulnerables*, por sexo, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Con el fin de modelar la distribución de probabilidades de todos los riesgos considerados en forma concurrente, es útil obtener la función de densidad de probabilidad conjunta de $\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, $f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(t, r)$, lo que permite estimar las probabilidades de fallecer en un ET por una causa determinada, en un periodo de tiempo y territorio específico.

Tal es el caso de la probabilidad de que (α) fallezca en un ET antes del tiempo t , debido a la causa r . En este planteamiento, como se requiere que ambos fenómenos concurren, el evento está definido por la intersección de los dos sucesos:

$$\begin{aligned}
 P[(0 \leq \mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) \leq t) \cap (\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon) = j)] &= \int_0^t f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(t, j) ds \\
 &= {}_t q_{\alpha_t}^{(j)} \quad t \geq 0, j = 1, \dots, r
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

De este modo, la función marginal de densidad de probabilidades de $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, $f_{\mathcal{R}}(r)$, denota la probabilidad de que a una persona en edad α le ocurra un ET de la clase r en cualquier momento. Es decir

$$\begin{aligned}
 P[(0 \leq \mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon) < \infty) \cap (\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon) = r)] &= \int_0^{\infty} f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(t, j) ds \\
 &= {}_{\infty} q_{\alpha_t}^{(j)} = f_{\mathcal{R}}(j) \quad j = 1, 2, \dots, r
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

Por otro lado, la función de densidad de probabilidad marginal de $\mathcal{T}_{\alpha_t}(\varepsilon)$, $f_{\mathcal{T}}(t)$, denota la probabilidad de participar y fallecer en un ET, que está dado por

$$f_{\mathcal{T}}(t) = \sum_{j=1}^r f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(t, j) \quad (4.19)$$

Para lo que se cumple que

$$\int_0^{\infty} f_{\mathcal{T}}(t) dt = 1$$

Como la función de distribución de \mathcal{T}_{α_t} con $t \geq 0$ se denota por $F_{\mathcal{T}}(t)$, entonces:

$$P[\mathcal{T}_{\alpha_t} \leq t] = \int_0^t f_{\mathcal{T}}(s) ds = F_{\mathcal{T}}(t)$$

Dado que la probabilidad de que una persona en edad α fallezca en un ET de cualquier tipo antes del tiempo t se denota ${}_t q_x^{(\tau)}$. El supraíndice (τ) se refiere a todas los tipos de ET. De manera que, igual que en el cálculo actuarial,

$$P[\mathcal{T}_{\alpha_t} \leq s] = F_{\mathcal{T}}(s) = \int_0^s f_{\mathcal{T}}(x) dx = {}_s q_x^{(\tau)} \quad (4.20)$$

De este modo, la probabilidad de que (α) fallezca por un ET depende de las r causas a las que está expuesto, a la intensidad de cada uno de los riesgos y en la exposición y vulnerabilidad de los individuos y su impacto colectivo. Así, la ecuación 4.20 se puede reescribir como

$$\begin{aligned} {}_t q_x^{(\tau)} &= \int_0^t f_{\mathcal{T}}(s) ds = \int_0^t \sum_{j=1}^r f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(s, j) ds \\ &= \sum_{j=1}^r \int_0^t f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(s, j) ds = \sum_{j=1}^r {}_t q_x^{(r)} \end{aligned} \quad (4.21)$$

La ecuación 4.21 se puede estimar directamente de los datos si los tipos de ET son mutuamente excluyentes, en donde las probabilidades condicionales ponderan los distintos grados de vulnerabilidad dentro de un tipo específico de riesgo r .

Análogamente, como ${}_t p_x^{(\tau)}$ representa la probabilidad de que (α) permanezca en el grupo de personas que sobreviven al tiempo t , entonces

$$Pr\{\mathcal{T}_{\alpha_t} > t\} = 1 - {}_t q_x^{(\tau)} \quad (4.22)$$

Por lo que la probabilidad de participar en un ET de cualquier tipo durante el periodo (a, b) está dado por

$$P[a \leq \mathcal{T}_{\alpha_t} \leq b] = \sum_{j=1}^r \int_a^b f_{\mathcal{T},\mathcal{R}}(s, j) ds$$

Como el propósito de la expansión de las ecuaciones consiste en considerar los diversos tipos de ET, es necesario contemplar tantas intensidades de ocurrencia de riesgo como tipos de ET existan en los registros. De este modo, la intensidad total con la que se participa se denota por $\mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon; t)$ y la magnitud

del riesgo r se denota por $\mu_{\alpha}^{(r)}(\varepsilon;t)$, por lo que se mantiene el concepto de intensidad del riesgo definida anteriormente.

Así, la intensidad con la que un grupo de personas en edad α participa en un ET de cualquier tipo en el tiempo t , es representada por $\mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon;t)$ y se denota por

$$\begin{aligned}\mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon;t) &= \frac{f_T(\varepsilon;t)}{1 - F_T(\varepsilon;t)} \\ &= \frac{1}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} \frac{d}{dt} {}_t q_{\alpha}^{(\tau)} = -\frac{d}{dt} \ln({}_t p_{\alpha}^{(\tau)})\end{aligned}\quad (4.23)$$

De donde

$${}_t p_x^{(\tau)} = \exp - \int_0^t \mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon;s) ds \quad (4.24)$$

Adicionalmente, la intensidad del r -ésimo riesgo $\mu_{\alpha}^{(r)}(\varepsilon;t)$ se define, a diferencia de la anterior, en función de la densidad de probabilidad conjunta $f_{T,\mathcal{R}}(t,r)$, siendo la función $S_{T_{\alpha}}(t) = 1 - F_{T_{\alpha}}(t)$. Por lo tanto, para una persona en edad α la magnitud del riesgo r a la edad $(\alpha + t)$ es

$$\begin{aligned}\mu_{\alpha}^{(r)}(\varepsilon;t) &= \frac{f_{T_{\alpha},\mathcal{R}}(t,r)}{1 - F_{T_{\alpha}}(\varepsilon;t)} \\ &= \frac{f_{T_{\alpha},\mathcal{R}}(t,r)}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} = \frac{1}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} \frac{d}{dt} {}_t q_{\alpha}^{(r)}\end{aligned}\quad (4.25)$$

Una vez obtenida la expresión para la fuerza de mortalidad de un ET por todas las causas, denotada por $\mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon;t)$, así como por la causa específica r , $\mu_{\alpha}^{(r)}(\varepsilon;t)$, es posible obtener la relación entre las fuerzas de mortalidad de los diferentes riesgos y la fuerza total mediante el desarrollo de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}\mu_{\alpha}^{(\tau)}(\varepsilon;t) &= \frac{1}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} \frac{d}{dt} {}_t q_{\alpha}^{(\tau)} \\ &= \frac{1}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^r {}_t q_{\alpha}^{(j)} \\ &= \sum_{j=1}^m \frac{1}{{}_t p_{\alpha}^{(\tau)}} \frac{d}{dt} {}_t q_{\alpha}^{(j)} \\ &= \sum_{j=1}^r \mu_{\alpha}^{(j)}(\varepsilon;t)\end{aligned}\quad (4.26)$$

Despejando la probabilidad de participar en un ET del tipo r en el periodo t y $(t + dt)$ de 4.26 se obtiene

$$f_{T_{\alpha},\rho}(t,r) = {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(j)}(\varepsilon;t), j = 1, \dots, r, \quad t \geq 0 \quad (4.27)$$

De donde también se deduce que la probabilidad de que ocurra una defunción por una DT en el lapso t y $(t + dt)$, debido a la causa r , es el complemento de a la probabilidad de que (α) no muera en un ET antes del tiempo t , ${}_t p_x^{(\tau)}$, multiplicado por la intensidad condicional $\mu_\alpha^{(j)}(\varepsilon; t)$ de que (α) fallezca en un ET del tipo r entre t y $(t + dt)$, dado que este no ha ocurrido antes del tiempo t .

Integrando 4.27 en ambos lados, se obtiene la probabilidad de que (α) se involucre en un ET al alcanzar la edad $(\alpha + t)$ debido a la causa r

$$\int_0^t f_{T,\alpha,\rho}(s, r) ds = \int_0^t {}_s p_x^{(\tau)} \cdot \mu_\alpha^{(j)}(\varepsilon; s) ds \quad (4.28)$$

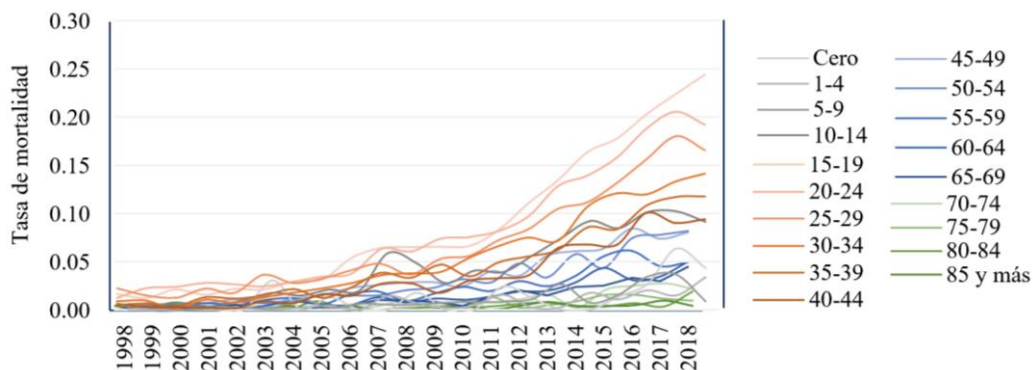
Finalmente, la función de probabilidad condicional de ρ , dada la ocurrencia del ET al tiempo t , es

$$f_{\rho|T_\alpha}(r|t) = \frac{f_{T,R}(t, r)}{f_T(t)} = \frac{{}_t p_x^{(\tau)} \cdot \mu_\alpha^{(j)}(\varepsilon; t)}{{}_t p_x^{(\tau)} \cdot \mu_\alpha^{(\tau)}(\varepsilon; t)} = \frac{\mu_\alpha^{(j)}(\varepsilon; t)}{\mu_\alpha^{(\tau)}(\varepsilon; t)} \quad (4.29)$$

La igualdad de la ecuación 4.29 es particularmente relevante porque concluye que la fuerza mortalidad total producida por las discordancias de tránsito es la suma de las fuerzas individuales de los r tipos de ET sin emplear supuestos sobre su distribución o si estos son independientes. Como las estimaciones de las fuerzas de mortalidad incluyen de manera implícita las fuentes de exposición y vulnerabilidad de los distintos grupos poblacionales, si se desea conocer los efectos separados de ambos constructos, es posible realizar la estimación de las probabilidades condicionales de cada categoría de vulnerabilidad por separado sin afectar las estimaciones derivadas del modelo.

Esta forma de agregar y desagregar tipos de ET es por demás útil ya que permite comprender a los eventos con mucho mayor detalle, así como realizar estimaciones y estudios de impacto con mayor precisión. A partir de estos resultados, también es posible responder a otro planteamiento vital para conocer la evolución de las tasas de mortalidad de motociclistas por grupo etario para el periodo 1998-2018, lo que se muestra en color graduado en la Figura 4.25 de acuerdo con grupos de similitud.

Figura 4.169. Evolución de las *tasas de mortalidad* de motociclistas por grupo etario, 1998-2018

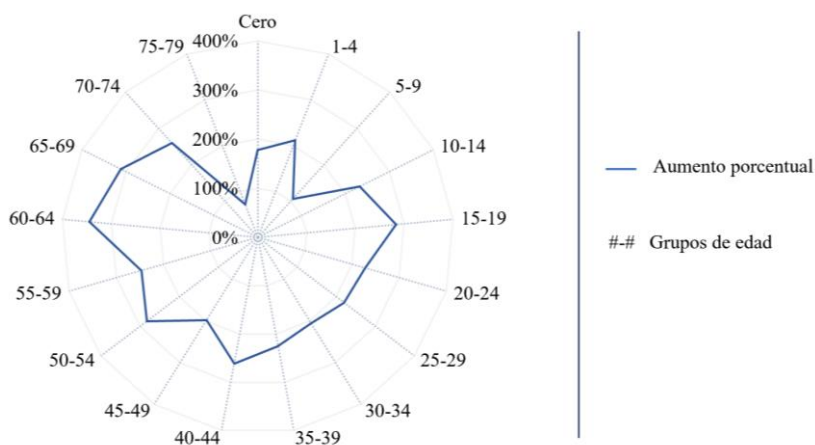


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, los niños y jóvenes entre cero y 14 años —en escala de grises—, y las personas mayores de 70 —escala de verdes— poseen las tasas de mortalidad en motocicleta más bajas, como se ha señalado anteriormente, las mayores tasas son en el grupo de 15 a 44 años, las cuales se han ido intensificando con el tiempo, particularmente en los jóvenes entre 15 y 24 años, que a partir de 2010 comenzaron a crecer a tasas sumamente aceleradas, seguidos de las personas entre 25 y 44 años, una situación que atenta contra el cumplimiento de los compromisos del país que consisten en estabilizar y después reducir el número de defunciones por ET.

En la Figura 4.26 se muestra en forma radial el incremento porcentual de la intensidad de la mortalidad en los motociclistas por grupo de edad, como puede observarse, exceptuando a los niños entre 5 y 9 años y los mayores de 70, todos los grupos superan el doble de las tasas de mortalidad observadas al inicio de la década —en el caso de 15 a 19 es prácticamente el triple—, lo que al traducirse a cifras absolutas muestra un panorama sumamente desalentador y exige acciones inmediatas que eviten que el número de muertes continúe aumentando.

Figura 4.170. Incremento de la *fuerza de mortalidad en los motociclistas* por grupo de edad, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

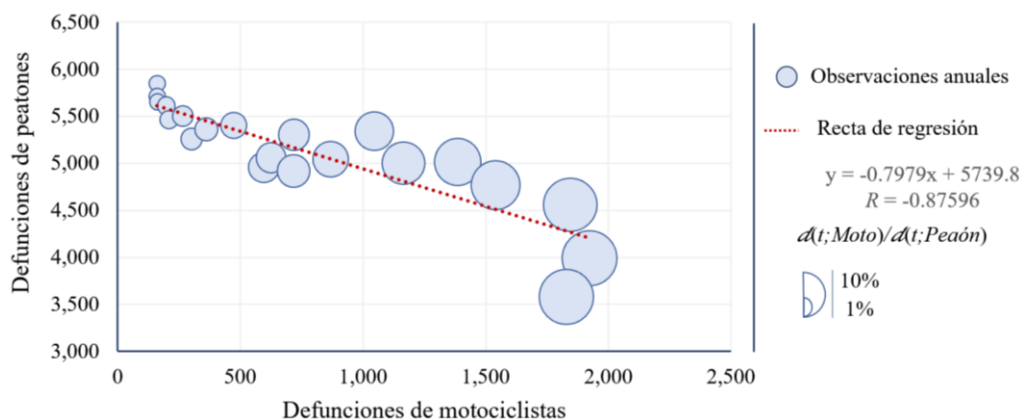
Continuando con el cumplimiento de metas para 2020, ya se ha comentado que existe evidencia contundente sobre una importante disminución en el número de defunciones de peatones, lo que produce un efecto mixto sobre el balance general de las metas que es necesario revisar. Un aspecto de vital importancia en el diseño de políticas públicas es el cambio de conductas y hábitos en la sociedad para abatir ciertos indicadores. En el ámbito de la movilidad, esto es especialmente relevante ya que

algunas veces se crean situaciones de *trade off*³⁵ que terminan por ser de bajo impacto, costosas, infructuosas e inviables en el mediano y largo plazo.

Por ejemplo, para realizar un rediseño de las vías o construir puentes peatonales, es necesario considerar que la vulnerabilidad de los peatones depende de su condición de exposición durante las acciones destinadas a la movilidad sin vehículo propio. Las ciudades que no ofrecen servicios de transporte eficientes o seguros presionan a las personas a buscar alternativas de movilidad que, además de costosas, pueden ser altamente peligrosas, desde luego, las posibilidades son restringidas y, frecuentemente, las elecciones ocurren en un contexto de información sesgada y con pocos grados de libertad, lo que fomenta la aceptación, minimización o invisibilización de riesgos asociados a la nueva elección. Uno de estos casos, podría ser la adquisición de una motocicleta como medio de transporte.

En la Figura 4.27 se muestra en círculos azules el número anual de defunciones de motociclistas en el eje horizontal y el de peatones en el vertical, el tamaño del círculo representa el peso relativo de las defunciones de motociclistas en el total de defunciones por ET. La comparación a lo largo de la serie 1998-2018 muestra un coeficiente de correlación negativo de $R = -0.8759$ ($p < 0.001$) que indica la posibilidad de que exista una ‘compensación de defunciones’ entre estos grupos.

Figura 4.171. Relación entre el número de defunciones de peatones y de motociclistas, 1998-2018



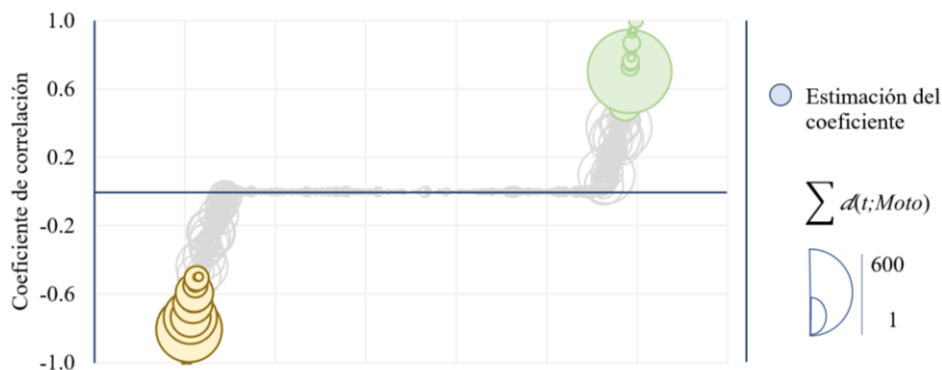
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

También es frecuente que los efectos de agregación territorial diluyan las relaciones entre variables, además, como es de esperarse, la correlación entre las defunciones de peatones y motociclistas no es homogénea en el territorio, lo que se observa al estimar el coeficiente de correlación entre las series a nivel municipal. En la Figura 4.28 se muestran los resultados con el fin de identificar en dónde se mantiene la probable relación: en amarillo se señalan los que obtuvieron un coeficiente significativo

³⁵ El primer uso conocido del *trade off* fue en 1909, se refiere a una situación en la que debe elegir o equilibrar dos cosas que son opuestas o que no se pueden tener al mismo tiempo (Merriam-Webster.co, 2020).

de signo negativo ($\rho < -0.5$), mientras que en color verde se muestra a aquellos municipios para los que la estimación dio un coeficiente positivo significativo ($\rho > 0.5$); el tamaño del círculo es proporcional al número de defunciones por cualquier ET.

Figura 4.172. Correlación a nivel municipal entre *defunciones de peatones y de motociclistas*, 1998-2018



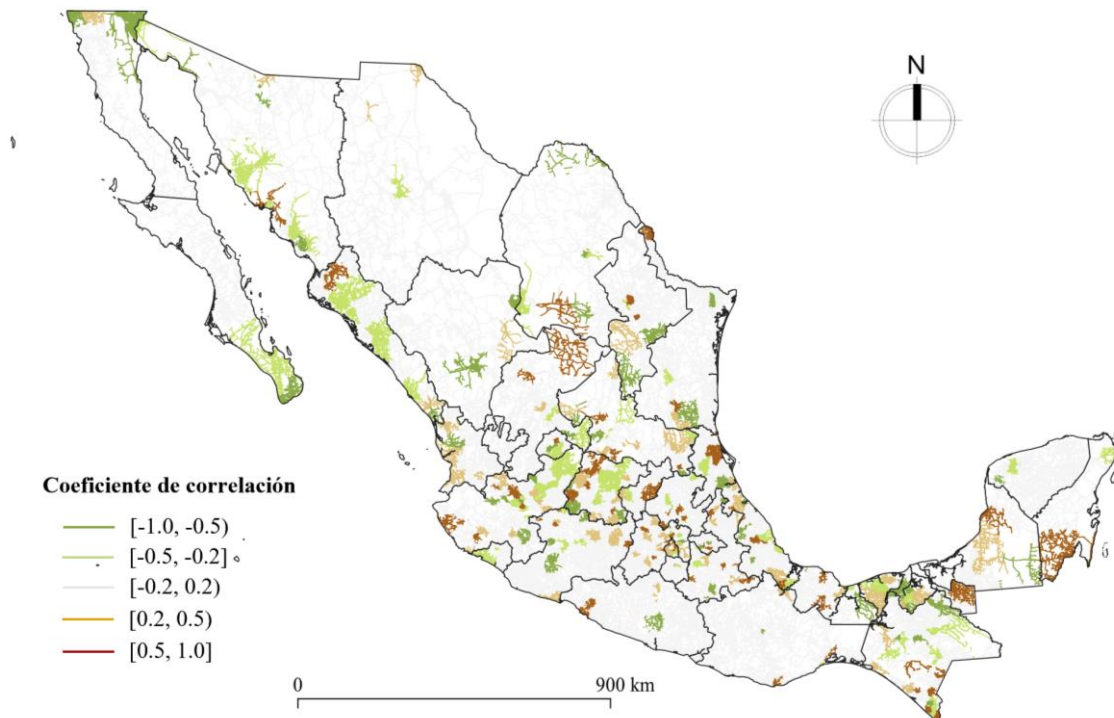
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, los municipios en los que los coeficientes resultan significativos poseen los mayores números de defunciones; en total, se reconocen 77 municipios con coeficiente negativo y 67 con un valor positivo, en ellos se agrupa poco más de 27 millones de personas, un aproximado de 21.4% de los 127 millones de habitantes; de los cuales 16.5 millones (13%) se ubican en los municipios que exhiben una correlación negativa —*trade off* entre las defunciones de peatones y motociclistas— y 10.7 millones (8.4%) poseen una correlación positiva y crecen de manera concurrente, lo que además coincide estrechamente con el 23.0% de defunciones de peatones en estos municipios—12.2% y 10.8%, respectivamente—, y el 24.3% de motociclistas —13.3% con coeficiente positivo y 11.0% con negativo—.

En el Mapa 4.5 se ha proyectado sobre la infraestructura carretera, en color graduado, el coeficiente de correlación entre las defunciones de peatones y de motociclistas. Aunque existen diversas hipótesis para explicar que unos municipios exhiban coeficientes positivos y otros negativos, aparecen dos que son relativamente plausibles:

1. El coeficiente negativo está motivado por el fenómeno de sustitución de medio de transporte y cambios en la movilidad (Zhao, P., 2010),
2. La correlación positiva se da por un aumento en la movilidad debido al crecimiento de la población y la posible presión originada por procesos de urbanización (Shearmur, R., 2007; Long, Y.; 2015).

Mapa 4.173. Correlación municipal entre *defunciones de peatones y motociclistas*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de estos resultados, es viable generar diversas estrategias para focalizar presupuestos con el fin de atender a la población más vulnerable, no obstante, para diseñar políticas públicas de alto impacto no basta con mejorar el registro y la modelación de los ET, también es necesario mejorar el diseño y la calidad de los datos desde su diseño, así como los procedimientos de levantamiento y control de calidad, ya que la aplicación de medidas éticas específicas demanda el conocimiento de las diferentes formas y grados de vulnerabilidad humana ante las distintas alternativas de movilidad.

Ante este desafío, se sugiere a las autoridades y tomadores de decisiones que enfoquen los esfuerzos en reducir activamente la vulnerabilidad intrínseca de los distintos grupos de personas en la vía (Almeida, 2010), así como disminuir sus conductas de riesgo más amplia con un abordaje integral que incluya las dimensiones sociales y humanas más allá ‘del triángulo de la seguridad vial’, lo que supera por mucho a la descripción de la mortalidad asociada con el tipo de vehículo y sugiere una visión multidimensional que considere a los factores asociados a las personas y los ET.

Ahora bien, con el fin de aumentar la capacidad de implementar la modelación, a continuación, se presentan ecuaciones que provienen de la teoría de decrementos múltiples en el cálculo actuarial (Skoog, G. R., & Ciecka, J. E., 2006). La ventaja de introducir estos nuevos elementos reside en que es posible desarrollar métodos numéricos basados en robustos procedimientos de estimación con el fin de aproximarse a las soluciones analíticas con mucho menor inversión computacional.

Así, dado que la estimación de la probabilidad de participar en un ET entre las edades $(x + k)$ y $(x + k + 1)$, debido a la causa r , depende de ${}_s p_{\alpha+k}^{(\tau)}$ con $0 \leq s \leq 1$ y, por tanto, depende de la intensidad de todos los riesgos competidores, por lo que buscar la solución en su forma analítica demanda enormes capacidades de cómputo, pero puede ser aproximada mediante métodos de convergencia comunes en las estimaciones estadísticas.

De este modo, las propiedades cualitativas también deben considerarse, por ejemplo, cuando se incrementan las magnitudes para otros tipos de ET, ${}_s p_{\alpha+k}^{(\tau)}$ se reduce y $q_{\alpha+k}^{(r)}$ disminuye para algunos r , pero no necesariamente para todos. De este modo, si se deseara estimar la privación de la vida asociada a cada uno de los distintos riesgos, para hallar el comportamiento de la familia $\{q_{\alpha+k}^{(r)}\}$ sería necesario extender el modelo analíticamente y realizar las estimaciones para todos los riesgos, no obstante, aunque el marco teórico y sus propiedades lo permiten, el costo algebraico y de programación puede ser sumamente alto al contrastar contra la alternativa de realizar las estimaciones mediante métodos numéricos, por lo cual aquí solo se desarrollarán los planteamientos para llevar a cabo las aproximaciones para datos con bloques de tiempo equidistantes representados en años de edad.

Al igual que en el capítulo anterior, se considera a la VA \mathcal{K}_{α_t} como aquella que denota los años completos que han transcurrido antes de la defunción de (α) por un ET, es decir, el entero más grande menor que \mathcal{J}_{α} . Utilizando los mismos argumentos que en la VA continua, la función de distribución conjunta de $\mathcal{K}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ es

$$\begin{aligned}
 P\{(\mathcal{K}_{\alpha_t}(\varepsilon)=k) \cap (\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)=r)\} &= P\{(k < \mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon) < k + 1) \cap (\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)=r)\} \\
 &= \int_k^{k+1} {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(\varepsilon; s) dt \\
 &= {}_k p_{\alpha}^{(\tau)} \int_0^1 {}_s p_{\alpha+k}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha+k}^{(r)}(\varepsilon; t) ds \\
 &= {}_k p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot q_{\alpha+k}^{(r)}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

donde

$$q_{\alpha+k}^{(r)} = \int_0^1 {}_s p_{\alpha+k}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha+k}^{(r)}(\varepsilon; t) ds$$

Así, el número real $q_{\alpha+k}^{(\tau)}$ denota la probabilidad de fallecer en un ET, por cualquiera de sus diferentes causas o tipos, entre las edades $(\alpha + k)$ y $(\alpha + k + 1)$, dado que se ha sobrevivido a la edad $(\alpha + k)$, para lo que se cumple lo siguiente:

$$q_{\alpha+k}^{(\tau)} = \int_0^1 {}_s p_{\alpha+k}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha+k}^{(\tau)}(\varepsilon; t) ds$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^1 s p_{\alpha+k}^{(\tau)} \cdot \sum_{r=1}^m \mu_{\alpha+k}^{(r)}(\varepsilon; t) ds \\
&= \sum_{r=1}^m \int_0^1 s p_{\alpha+k}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha+k}^{(r)}(\varepsilon; t) ds \\
&= \sum_{r=1}^m q_{\alpha+k}^{(r)} \tag{4.31}
\end{aligned}$$

Como puede verse, a partir de las ecuaciones 4.30 y 4.31 es posible emplear una enorme diversidad de métodos de aproximación computacional que permitan realizar los cálculos de entrada para las tablas de mortalidad, lo que simplifica el álgebra matricial para grandes bases de datos o con múltiples familias de riesgos y, al mismo tiempo, asegura la convergencia numérica, para lo cual es útil sintetizar las expresiones analíticas de las funciones de densidad que es necesario simular o aproximar mediante la siguiente tabla.

Tabla 4.1. Expresiones analíticas para las funciones de densidad.

F.d.p. conjunta de $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$	$f_{\mathcal{J}_{\alpha_t}, \mathcal{R}_{\alpha_t}}(t, r) = {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t)$
F.d.p marginal de $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$	$f_{\mathcal{R}_{\alpha_t}}(r) = {}_{\infty} q_{\alpha}^{(r)}$
F.d.p marginal de $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)$	$f_{\mathcal{J}_{\alpha_t}}(t) = {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(\tau)}(t)$

En donde ${}_{\infty} q_{\alpha}^{(r)}$ indica la probabilidad de defunción por el tipo r en un horizonte temporal suficientemente largo, probabilidad que en el modelo univariado converge a 1, aunque es necesario reconocer que este supuesto teórico solo se cumple en la realidad para todas las causas operando sobre la población como una sola, ya que, incluso en un tiempo infinito, es altamente probable que a una gran cantidad de personas no fallezcan por un ET o alguna otra causa particular.

Tabla estructural de competencia de riesgos

Para gestionar ágilmente las probabilidades asociadas a la ocurrencia de múltiples riesgos es útil realizar un diseño matricial con las probabilidades de ocurrencia de los riesgos definidos mediante tipologías. Como complemento del modelo, se propone la construcción de una *Tabla estructural de competencia de riesgos* (TECR), en la cual se consideren todos los grupos de vidas de edad α denotado por $\pi_{\alpha}^{(\tau)}$. La función de densidad conjunta de $\mathcal{J}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ y $\mathcal{R}_{\alpha_t}(\varepsilon)$ para este grupo, la cual está dada por:

$$f_{\mathcal{J}_{\alpha_t}, \mathcal{R}_{\alpha_t}}(t, r) = {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) \quad t \geq 0, r = 1, \dots, m \tag{4.32}$$

A partir de la ecuación anterior, considere la VA $\mathbb{I}_{\alpha}^{(\tau)}(t)$ que denota el número de personas de edad α que han sobrevivido a edad $(\alpha + t)$ de las $\pi_{\alpha}^{(\tau)}$ vidas iniciales en edad α . Análogo a lo desarrollado en el capítulo anterior:

$$\begin{aligned}
\pi_{\alpha+t}^{(r)} &= E \left[\mathbb{I}_{\alpha}^{(r)}(t) \right] \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \exp \left[- \int_0^t \mu_{\alpha}^{(\tau)}(y - \alpha) dy \right]
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Ahora bien, para obtener el número de involucrados registrados en n años por la causa r , $n i_{\alpha}^{(r)}$, es necesario considerar a la VA ${}_n \mathbb{I}_{\alpha}^{(r)}(t)_{\alpha}^{(r)}$, que denota el número de sujetos involucrados entre las edades α y $(\alpha + n)$, por la causa r . De manera que

$$\begin{aligned}
{}_n \mathbb{I}_{\alpha}^{(r)} &= E \left[{}_n \mathbb{I}_{\alpha}^{(r)}(t)_{\alpha}^{(r)} \right] \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \int_{x-\alpha}^{x+n-\alpha} {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Para $n = 1$, $x = \alpha$ y $s = t - (x - \alpha)$ y por (4.32) y (4.34)

$$\begin{aligned}
\mathbb{I}_{\alpha}^{(r)} &= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \int_0^1 {}_{s+x-\alpha} p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(s) ds \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot {}_{x-\alpha} p_{\alpha}^{(\tau)} \int_0^1 {}_s p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(s) ds \\
&= \pi_x^{(\tau)} \cdot q_{\alpha}^{(r)}
\end{aligned} \tag{4.35}$$

De esta forma resulta, que $q_{\alpha}^{(r)}$ es la proporción $\pi_{\alpha}^{(\tau)}$ que sobreviven a la edad α y que fallecen por la causa r antes de cumplir la edad $(\alpha + 1)$, cuando todos los m tipos de ET están compitiendo entre ellos. Así, como el total de ET registrados durante n años debe ser igual al número de ET ocurridos durante ese periodo, independientemente de la causa que lo generó, entonces

$${}_n \mathbb{I}_{\alpha}^{(\tau)} = E \left[{}_n \zeta_{\alpha}^{(\tau)} \right] = \sum_{r=1}^m n i_{\alpha}^{(r)} \tag{4.36}$$

Que al utilizar la igualdad dada en 4.36, resulta:

$$\begin{aligned}
{}_n \mathbb{I}_{\alpha}^{(\tau)} &= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \sum_{r=1}^m \int_{x-\alpha}^{x+n-\alpha} {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \int_{x-\alpha}^{x+n-\alpha} {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(\tau)}(t) dt
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Dada la importancia de extrapolar estas estimaciones en ausencia de datos, se propone un camino alternativo para obtener el total de los ET ocurridos en un periodo de tiempo sin importar la causa, lo cual es posible a través de la diferencia entre las vidas que llegan a la edad α y las que llegan a la edad $(\alpha + 1)$ sin haber fallecido en un ET. Es decir

$$\begin{aligned}
\mathbb{I}_{\alpha}^{(\tau)} &= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \pi_{\alpha+1}^{(\tau)} \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \left(1 - \frac{\pi_{\alpha+1}^{(\tau)}}{\pi_{\alpha}^{(\tau)}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \left\{ 1 - \exp \left[- \int_{\alpha}^{\alpha+1} \mu_y^{(\tau)} dy \right] \right\} \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \left[1 - p_{\alpha}^{(\tau)} \right] \\
&= \pi_{\alpha}^{(\tau)} \cdot q_{\alpha}^{(\tau)} \tag{4.38}
\end{aligned}$$

En este caso las funciones de probabilidad emplean un intervalo de tiempo en el cual el grupo se reduce por los diversos tipos de ET. Por lo tanto, el número de miembros que fallecen por la causa (r) no es independiente de la magnitud de las salidas por las otras causas, por ello, si el efecto de estas fuerzas es mayor, el número de salidas por la causa r deberá ser menor y también menor será la probabilidad de salida por la causa r .

En las siguientes expresiones se observa que la probabilidad de fallecer en un ET por la causa r depende de la intensidad de todos los demás tipos de ET.

$${}_t q_{\alpha}^{(r)} = \int_0^t {}_s p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(s) ds \tag{4.39}$$

Sustituyendo ${}_s p_{\alpha}^{(\tau)}$ de (4.39)

$${}_t q_{\alpha}^{(r)} = \int_0^t e^{-\int_0^t \mu_{\alpha}^{(\tau)}(s) ds} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(s) ds \tag{4.40}$$

Como $\mu_{\alpha}^{(r)}$ no se refiere a ningún intervalo de tiempo, tampoco se ve afectado por la influencia de los demás tipos de ET. Por lo tanto, las fuerzas instantáneas de mortalidad son funciones independientes, a diferencia de las probabilidades de discordancia, las cuales son dependientes entre sí.

Además, si se requiere estimar los valores de $\mu_{\alpha}^{(r)}$, estos se pueden obtener a partir de las diferentes tablas individuales, las cuales pueden hacerse expofeso a través de ecuaciones de aproximación en función de los $\pi_{\alpha}^{(r)}$ que requieren ser colocados en dichas tablas.

Tasas Absolutas de Riesgos

A partir de este modelo de múltiples riesgos es posible obtener modelos individuales para las defunciones por causas que hayan sido medidas fuera del conjunto oficial, ya sea porque se integran datos de una investigación *ad hoc*, o porque se cuenta con datos no normalizados, pero que es necesario o deseable realizar de manera independiente con el requerimiento de incorporar o censurar los datos de uno o varios de los tipos de ET, lo que obviamente debe realizarse sin perder potencia estadística y asegurando que la información proporcionada contenga las mismas propiedades del modelo general para cada causa.

Para atender esta situación particular, la cual resulta cada vez más frecuente, es posible construir un modelo que se base en su propia intensidad de riesgo y cuyas probabilidades sean independientes de la influencia de otras causas. El procedimiento comienza con la construcción de la *Matriz de Probabilidades de Riesgos Individuales* (MAPRI), lo que permite emplear el instrumental desarrollado. Por ejemplo, si sólo se desea construir un modelo de doble salida, en donde los riesgos compitiendo son atropellamiento y colisión, es posible obtener un modelo por atropellamiento y otro por colisión, lo que puede llevarse a cabo incluso con diferentes fuentes de información.

Por supuesto, al igual que en el modelo individual, para la construcción de una tabla de riesgos se supone un radix, en este caso $\pi_0^{(r)}$. Así, las funciones asociadas al modelo de riesgo sin competencia son:

$$\pi_\alpha^{(r)} = \pi_0^{(r)} e^{-\int_0^1 \mu_y^{(r)} dy} \quad (4.41)$$

$${}_t p_\alpha^{(r)} = \exp \left[- \int_0^t \mu_\alpha^{(r)}(s) ds \right]$$

$${}_t q_\alpha^{(r)} = 1 - {}_t p_\alpha^{(r)} \quad (4.42)$$

En un modelo de una salida, estas son las relaciones típicas que se verifican. Si, por mencionar alguna, la única causa fuera la colisión, las funciones $\pi_\alpha^{(r)}$, ${}_t p_\alpha^{(r)}$, ${}_t q_\alpha^{(r)}$ son simplemente π_α , ${}_t p_\alpha$, ${}_t q_\alpha$. Es importante resaltar que $q_\alpha^{(r)}$ no es una probabilidad de participación, tal como ocurre con $q_\alpha^{(r)}$.

En el contexto de múltiples causas de participación en ET, $q_\alpha^{(r)}$ es llamada tasa absoluta de ocurrencia del riesgo definido, para evitar llamarla probabilidad. Más adelante se muestra en que se diferencian, por el momento, es suficiente señalar que ${}_t p_\alpha^{(r)}$ no es necesariamente una función de sobrevivencia, tal como ocurre con ${}_t p_\alpha^{(r)}$, pues no se requiere que $\lim_{t \rightarrow \infty} {}_t p_\alpha^{(r)} = 0$.

Por lo que respecta a las intensidades de riesgo por cualquier causa y para una causa determinada, respectivamente, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\int_0^\infty \mu_\alpha^{(r)}(t) dt = \infty \quad (4.43 a)$$

$$\int_0^\infty \mu_\alpha^{(r)}(t) dt = \infty \quad (4.43 b)$$

Desde luego, dada la ausencia de certeza sobre la convergencia de ${}_t p_\alpha^{(r)}$, es posible hallar causas de defunción para los que la integral 4.43b sea finita.

Construcción de la TECR

Hasta aquí se han mostrado los detalles técnicos para obtener una tabla por cada riesgo. El siguiente apartado muestra el procedimiento inverso, es decir, construir una TECR a partir de un conjunto de tablas de riesgos individuales. Para ello es necesario mostrar las relaciones entre ambos conjuntos de información.

Suponga que se disponen de m conjuntos de información de un único riesgo cada uno, mismos que constituyen los riesgos de un modelo colectivo. Como se señaló en 4.26

$$\mu_{\alpha}^{(\tau)} = \mu_{\alpha}^{(1)} + \mu_{\alpha}^{(2)} + \dots + \mu_{\alpha}^{(r)} \quad (4.44)$$

Y retomando 4.24

$$\begin{aligned} {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} &= e^{\int_0^t \mu_{\alpha}^{(\tau)}(s) ds} \\ \mu_{\alpha}^{(\tau)}(t) &= \exp \left[- \int_0^t \left(\mu_{\alpha}^{(1)}(s) + \mu_{\alpha}^{(2)}(s) + \dots + \mu_{\alpha}^{(r)}(s) \right) ds \right] \\ &= \exp \left[- \int_0^t \mu_{\alpha}^{(1)}(s) \right] \exp \left[- \int_0^t \mu_{\alpha}^{(2)}(s) \right] \dots \exp \left[- \int_0^t \mu_{\alpha}^{(r)}(s) \right] \\ &= {}_t p_{\alpha}^{\prime(1)} \cdot {}_t p_{\alpha}^{\prime(2)} \cdot \dots \cdot {}_t p_{\alpha}^{\prime(m)} \end{aligned}$$

por lo tanto

$${}_t p_{\alpha}^{(\tau)} = \prod_{i=1}^r {}_t p_{\alpha}^{\prime(i)} \quad (4.45)$$

Como puede corroborarse, este resultado no involucra ninguna aproximación y se basa en la definición de riesgos simples asociados, donde la única fuerza de participación en un ET es la ocurrencia registrada de eventos de tránsito por todas las causas y sus defunciones respectivas.

En 4.45 también se puede observar que la magnitud de la tasa absoluta de riesgo, respecto de la probabilidad de participación en un ET por cualquier causa, es menor, ya que se mantiene la siguiente relación para todo t y α ,

$${}_t p_{\alpha}^{\prime(j)} \geq {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \quad (4.46)$$

La magnitud de las diversas intensidades de riesgo puede causar que ${}_t p_{\alpha}^{\prime(r)}$ sea considerablemente mayor que ${}_t p_{\alpha}^{(\tau)}$ de manera que las matrices individuales asociadas presentarán diferencias significativas. Como la relación 4.46 se mantiene al multiplicar en ambos lados por $\mu_{\alpha}^{(r)}(t)$, se obtiene lo siguiente:

$${}_t p_{\alpha}^{\prime(r)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) \geq {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) \quad (4.47)$$

Si se integra 4.47 con respecto a t sobre el intervalo $(0,1)$, se obtiene

$$q_{\alpha}^{\prime(r)} = \int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{\prime(r)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt \geq \int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt = q_{\alpha}^{(r)} \quad (4.48)$$

Por lo que se concluye que cuando varias tasas de ocurrencia operan simultáneamente, la tasa de realización para una causa dada es mayor que su correspondiente probabilidad de decremento.

Una vez mostradas estas relaciones, se obtienen las expresiones para la construcción de una TECR a partir de diversas tablas individuales. Retomando 4.45

$${}_t p_{\alpha}^{(\tau)} = \prod_{i=1}^m {}_t p_{\alpha}^{(r)} \quad (4.49)$$

Es decir, ${}_t p_{\alpha}^{(\tau)}$ se obtiene a través del conjunto dado de $p_{\alpha}^{(r)}$ para todos los posibles valores de r y $q_{\alpha}^{(\tau)}$ se construye mediante $q_{\alpha}^{(\tau)} = 1 - p_{\alpha}^{(\tau)}$. Desde luego, para generar las $q_{\alpha}^{(r)}$ que componen a $q_{\alpha}^{(\tau)}$, se deben utilizar los supuestos de la sección anterior, al igual que las expresiones propuestas.

Como normalmente 4.48 no pueden ser estimada directamente, los valores $q_{\alpha}^{(r)}$ son usualmente determinados por métodos de aproximación, comúnmente a partir de los datos de la TECR. Para llevarlo a cabo, los métodos de aproximación propuestos son los siguientes: *Aproximación Media*, *Distribución Uniforme e Intensidad Constante de Ocurrencia*.

Tasa central de riesgos múltiples

En las secciones anteriores de este capítulo se han desarrollado ya los métodos de estimación para probabilidades, tasas y fuerzas de múltiples riesgos definidos en forma individual y colectiva. En esta sección se presenta la tasa central de defunción por múltiples riesgos y la tasa central asociada a cada riesgo individual. La importancia de obtener esta medida se debe a que, con frecuencia, la experiencia obtenida de un grupo de personas sujetas a diversos tipos de riesgo se resume en tasas centrales. De manera que es conveniente establecer una relación directa entre estas medidas y las aquí propuestas, lo que posibilita la construcción de las TECR a partir de tasas centrales de defunción por cada causa o los datos primarios con los que se calculan dichas tasas.

De este modo, h_{α} representa la tasa central de mortalidad a la edad α y se estima a partir del siguiente planteamiento:

$$h_{\alpha} = \frac{\int_0^1 {}_t p_{\alpha} \cdot \mu_{\alpha}(t) dt}{\int_0^1 {}_t p_{\alpha} dt} = \frac{\int_0^1 \pi_{\alpha+t} \cdot \mu_{\alpha}(t) dt}{\int_0^1 \pi_{\alpha+t} dt} \quad (4.50)$$

Em donde h_{α} es el promedio ponderado de las diversas fuerzas de mortalidad entre las edades α y $(\alpha+1)$ y, en el contexto de múltiples riesgos compitiendo por ocurrir, la tasa central de mortalidad incluye a todas las posibles fuentes de riesgo a las que está expuesta una persona en edad α , que por extensión se define como:

$$h_{\alpha}^{(\tau)} = \frac{\int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(\tau)}(t) dt}{\int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} dt} \quad (4.51)$$

Siendo esta un promedio ponderado de la fuerza $\mu_{\alpha}^{(\tau)}(t)$ con $0 \leq t \leq 1$.

Análogamente, la tasa central de mortalidad por la causa r , es

$$h_{\alpha}^{(r)} = \frac{\int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{(r)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt}{\int_0^1 {}_t p_{\alpha}^{(r)} dt} \quad (4.52)$$

Para la cual se cumple la siguiente relación:

$$h_{\alpha}^{(\tau)} = \sum_{r=1}^m h_{\alpha}^{(r)} \quad 3$$

De este modo, para las estimaciones individuales, la tasa central está dada por

$$h'_{\alpha}^{(r)} = \frac{\int_0^1 {}_t p'_{\alpha}^{(r)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt}{\int_0^1 {}_t p'_{\alpha}^{(r)} dt} \quad (4.54)$$

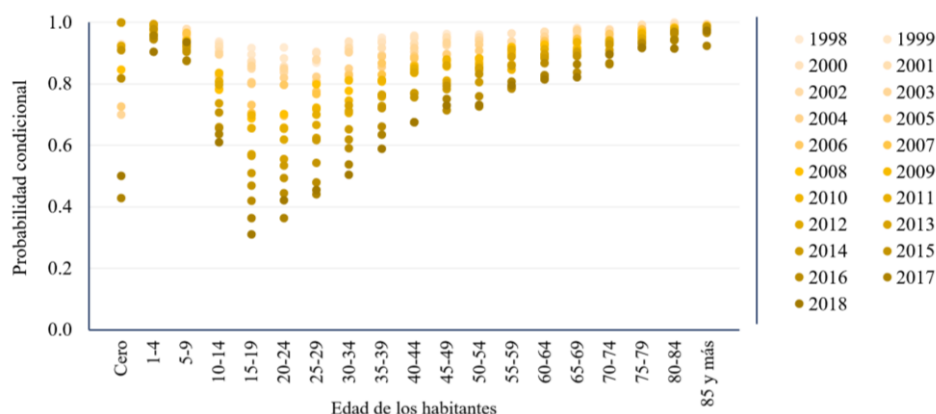
En donde $h'_{\alpha}^{(r)}$ es también un promedio ponderado de $\mu_{\alpha}^{(r)}(t)$ $0 \leq t < 1$, cuyas ponderaciones están dadas por ${}_t p'_{\alpha}^{(r)}$ en lugar de ${}_t p_{\alpha}^{(r)}$. Asimismo, si la fuerza $\mu_{\alpha}^{(r)}(t)$ es constante para $0 \leq t < 1$, entonces

$$h_{\alpha}^{(r)} = h'_{\alpha}^{(r)} = \mu_{\alpha}^{(r)}(0)$$

Las ventajas de emplear las tasas centrales de mortalidad son múltiples, por ejemplo, dado que el grupo fuertemente vulnerable en la vía está dado por peatones, ciclistas y motociclistas, una pregunta de enorme interés es la evolución de su composición a lo largo del tiempo, lo que brindaría elementos objetivos para destinar recursos y esfuerzos con base en evidencias, pero que hasta ahora es difícil de estimar debido a la ausencia de datos suficientemente desagregados o incompatibilidad de los índices de los datos para realizar las inferencias.

Este procedimiento resulta de interés para reconocer la posible dominación de los peatones en cada grupo etario y su evolución a lo largo del tiempo, lo que se investigó mediante la estimación de las tasas centrales de riesgo de los tres tipos de usuario para agregarlas en una 'gran tasa central de riesgo del grupo altamente vulnerable'. Los resultados se muestran en la Figura 4.29, que muestra en círculos de color graduado a los pesos de la tasa central de riesgo de los peatones respecto al grupo.

Figura 4.174. Peso de la *tasa central de riesgo de los peatones* respecto al grupo etario, 1998-2018



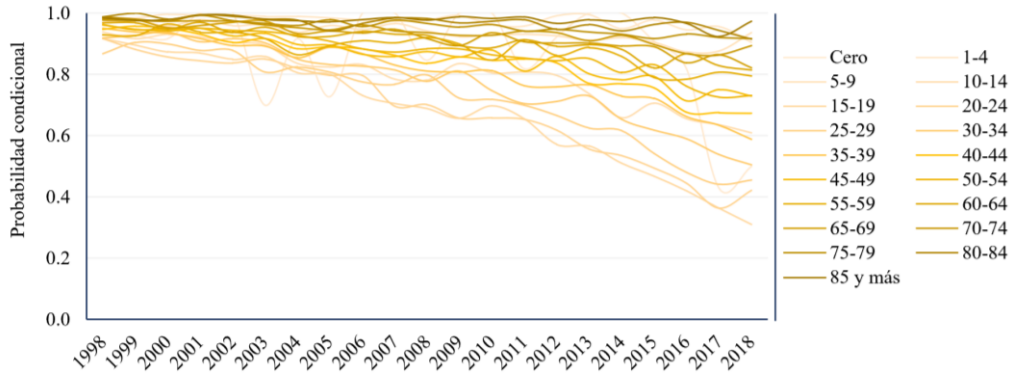
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede verse, los pesos relativos de las defunciones en peatones varían importantemente de acuerdo con la edad, por ejemplo, las defunciones de los niños entre 1 y 9 años y los mayores de 75 son cercanas a 1, señalando que prácticamente todas las defunciones en estos rangos de edad se dan en peatones.

Por lo contrario, la dispersión en el grupo de 10 a 14 años señala que del año 1998 al 2000, la mayoría de las defunciones por ET también ocurrían en peatones, no obstante, algunos riesgos comenzaron a hacerse más presentes logrando disminuir el peso de esta fuerza de 0.93 a 0.61 en 2018; una dinámica similar se observa en los jóvenes entre 15 y 19 años, en la que la magnitud de los otros riesgos competidores ha logrado reducir este tipo de 0.92 a 0.31, lo que corrobora que en este grupo de edad ya no predominan las defunciones por ET como personas vulnerables, sino como participantes activos en distintos tipos de riesgo.

Para ampliar la información provista por las estimaciones de las tasas centrales de riesgo y el rol de los peatones dentro del grupo vulnerable, en la Figura 4.30 se muestra la evolución de las estimaciones del peso del riesgo de los peatones sobre el riesgo de las defunciones en personas vulnerables en el periodo 1998-2018, como puede corroborarse, en los menores de 44 años, en 1998 todos se encontraban por encima de 0.9 y, a través de los años, comenzaron a experimentar un decrecimiento sostenido.

Figura 4.8. Evolución del peso del riesgo de los peatones en los fuertemente vulnerables, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Las pendientes con las que disminuyen los pesos relativos de los peatones en el riesgo total del grupo representan la velocidad con las que los otros riesgos competidores han ido modificando la dinámica de las defunciones por ET en cada grupo etario. De esta manera, los gradientes en las pendientes indican la velocidad con la que los distintos grupos etarios han mudado de hábitos de transporte y su magnitud indica en qué medida se han adquirido o potenciado nuevos riesgos y su capacidad de producir defunciones.

Intensidad constante de riesgo

El segundo método para obtener estimaciones de las probabilidades es utilizando el supuesto de *intensidad de riesgo constante* para cada discordancia sobre el intervalo $(\alpha, \alpha + 1)$, el cual consiste en suponer que

$$\mu_{\alpha}^{(r)}(t) = \mu_{\alpha}^{(r)}(0) \quad (4.55)$$

y

$$\mu_{\alpha}^{(\tau)}(t) = \mu_{\alpha}^{(\tau)}(0), \quad 0 \leq t \leq 1$$

Aplicando este supuesto a la probabilidad de realización del riesgo de tipo r , con $0 \leq s \leq 1$, se tiene que

$$\begin{aligned} {}_s q_{\alpha}^{(r)} &= \int_0^s {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt \\ &= \frac{\mu_{\alpha}^{(r)}(0)}{\mu_{\alpha}^{(\tau)}(0)} \int_0^s {}_t p_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) dt \end{aligned} \quad (4.56)$$

Bajo el mismo supuesto, para cualquier r entre $(0,1)$

$$r \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(0) = -\ln {}_r p_{\alpha}^{(\tau)}$$

y

$$r \cdot \mu_{\alpha}^{(j)}(0) = -\ln {}_r p_{\alpha}^{\prime(j)}$$

Sustituyendo en (4.56)

$${}_s q_\alpha^{(j)} = \frac{\ln {}_r p_\alpha^{(j)}}{\ln {}_r p_\alpha^{(\tau)}} \cdot q_\alpha^{(\tau)}$$

A partir de esta expresión es posible despejar ${}_r p_\alpha^{(r)}$

$$r \cdot p_\alpha^{(r)} = \left({}_r p_\alpha^{(\tau)} \right)^{{}_s q_\alpha^{(r)} / {}_s q_\alpha^{(\tau)}} \quad (4.57)$$

y como en el límite el valor de r va a 1, se obtiene dejando $q_\alpha^{(r)}$

$$q_\alpha^{(r)} = 1 - \left(p_\alpha^{(\tau)} \right)^{\frac{{}_s q_\alpha^{(r)}}{{}_s q_\alpha^{(\tau)}}}$$

o bien

$$q_\alpha^{(r)} = 1 - \left[1 - q_\alpha^{(\tau)} \right]^{\frac{{}_s q_\alpha^{(r)}}{{}_s q_\alpha^{(\tau)}}} \quad (4.58)$$

Como puede observarse, las aproximaciones obtenidas de los supuestos de distribución uniforme y fuerza de decremento constantes conducen a las mismas expresiones para el cálculo de $q_\alpha^{(r)}$, lo que se logra al utilizar las probabilidades $q_\alpha^{(r)}$ y $q_\alpha^{(\tau)}$, con $s = r = 1$.

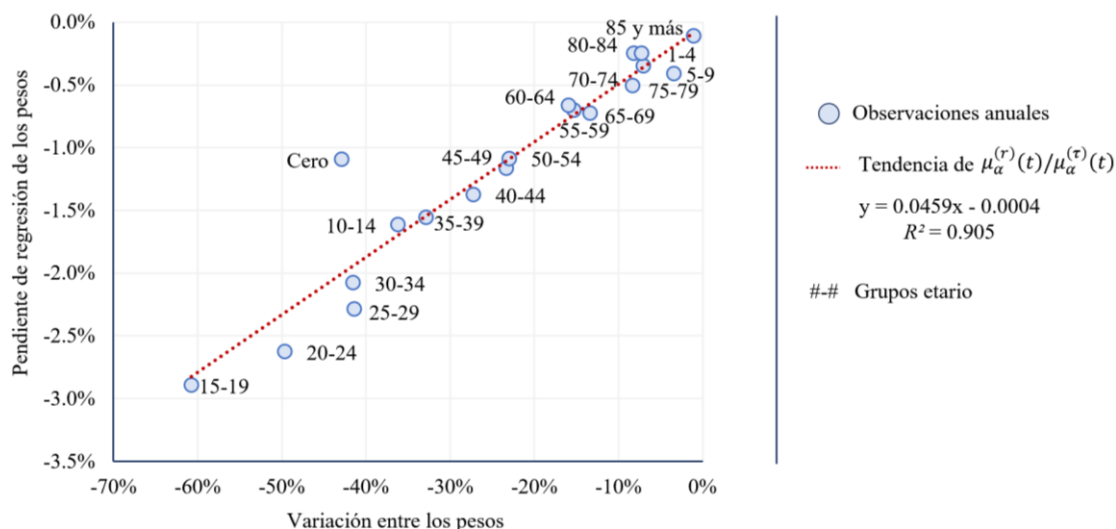
También es posible obtener $q_\alpha^{(r)}$ para valores dados de $q_\alpha^{(r)}$, a través de la expresión 4.57 con r y s próximos a 1. Desde luego, esta última expresión y 4.58 requieren un tratamiento especial si $p_\alpha^{(r)}$ o $p_\alpha^{(\tau)}$ es igual a cero. Por lo que corresponde a las expresiones en las ecuaciones 4.57 y 4.58, puede afirmarse que ambas son equivalentes al mismo proceso de estimación.

El uso de este resultado puede ayudar a comprender, por ejemplo, la forma en que los riesgos competidores han ido disminuyendo la intensidad de las defunciones de peatones entre las personas fuertemente vulnerables y cómo los riesgos de defunción por todos los demás riesgos competidores han ido en aumento, lo que se puede contrastar al estimar la tendencia evolutiva del riesgo elegido, entre las tendencias de los demás riesgos. Para complementar la información derivada de la pendiente de la tendencia, es útil estimar la magnitud del gradiente producido durante el periodo de tiempo sobre el que se estima la tendencia, de este modo, se puede conocer intensidad y severidad en un mismo análisis.

En la Figura 4.31, los círculos muestran la relación entre la tendencia y la variación estimada en los pesos entre los años 1998 y 2018, desagregados por grupo etario. A través de este gráfico se reconoce el mismo fenómeno señalado sobre los jóvenes mediante las pendientes de cada grupo de edad — situados en el eje vertical— la velocidad con la que los riesgos competidores han ido ganando terreno en la intensidad de las defunciones y la magnitud de sustitución alcanzada durante los 20 años del periodo analizado.

Así, por ejemplo, los jóvenes entre 15 y 19 años han sido el grupo en el que los otros riesgos han crecido con mayor intensidad y, también, en el que se ha dado el mayor porcentaje absoluto de sustitución. Por lo contrario, como ya se había identificado en la Figura 4.31, los niños entre 1 y 9 años, así como los mayores de 80, permanecen invariantes y su tasa de mortalidad por ET continúa siendo dominada por el riesgo de morir como peatón.

Figura 4.175. Relación entre la *pendiente de regresión* y la *variación en los pesos* entre 1998 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Distribución Uniforme de Riesgos Múltiples

En el tercer método de aproximación se hace uso de la hipótesis de *distribución uniforme* en el contexto de riesgos múltiples compitiendo sobre el intervalo $(\alpha, \alpha + 1)$, para estimar las probabilidades de defunción. Para lograrlo, se supone además que

$${}_tq_{\alpha}^{(r)} = t \cdot q_{\alpha}^{(r)} \quad r = 1, 2, \dots, m \text{ y } 0 \leq t \leq 1 \quad (4.59)$$

y

$${}_tq_{\alpha}^{(\tau)} = t \cdot q_{\alpha}^{(\tau)}$$

Bajo el supuesto dado, se observa de 4.53 que

$${}_tp_{\alpha}^{(\tau)} \cdot \mu_{\alpha}^{(r)}(t) = q_{\alpha}^{(r)}$$

y

$$\mu_{\alpha}^{(r)}(t) = \frac{q_{\alpha}^{(r)}}{{}_tp_{\alpha}^{(\tau)}} = \frac{q_{\alpha}^{(r)}}{1 - t \cdot q_{\alpha}^{(\tau)}} \quad (4.60)$$

entonces

$$\begin{aligned}
{}_t p'_\alpha^{(r)} &= \exp \left[- \int_0^s \mu_\alpha^{(r)}(t) dt \right] \\
&= \exp \left[- \int_0^s \frac{q_\alpha^{(r)}}{1 - t \cdot q_\alpha^{(\tau)}} dt \right] \\
&= \exp \left[\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \ln \left(1 - s \cdot q_\alpha^{(\tau)} \right) \right] \\
&= \left({}_s p_\alpha^{(\tau)} \right)^{\left(\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \right)} \tag{4.61}
\end{aligned}$$

y también

$$\begin{aligned}
{}_t q'_\alpha^{(r)} &= 1 - \exp \left[- \int_0^s \mu_\alpha^{(r)}(t) dt \right] \\
&= 1 - \exp \left[- \int_0^s \frac{q_\alpha^{(r)}}{1 - t \cdot q_\alpha^{(\tau)}} dt \right] \\
&= 1 - \exp \left[\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \ln \left(1 - s \cdot q_\alpha^{(\tau)} \right) \right] \\
&= 1 - \left({}_s p_\alpha^{(\tau)} \right)^{\left(\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \right)}
\end{aligned}$$

o bien

$$= 1 - \left(1 - q_\alpha^{(\tau)} \right)^{\left(\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \right)} \tag{4.62}$$

Desarrollando el binomio de 4.62, se obtiene

$$1 - \left\{ 1 - \frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} q_\alpha^{(\tau)} + \frac{1}{2} \frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} \left(\frac{q_\alpha^{(r)}}{q_\alpha^{(\tau)}} - 1 \right) \left(q_\alpha^{(\tau)} \right)^2 - \dots \right\} \tag{4.63}$$

Dejando solo los términos indicados y simplificando la expresión, la ecuación 4.63 se obtiene por truncamiento del desarrollo binomial hasta el segundo término:

$$\begin{aligned}
q'_\alpha^{(r)} &\cong q_\alpha^{(r)} \left[1 + \frac{1}{2} \left(q_\alpha^{(\tau)} - q_\alpha^{(r)} \right) \right] \\
&= q_\alpha^{(r)} \left(1 + \frac{1}{2} \left(q_\alpha^{(-r)} \right) \right)
\end{aligned}$$

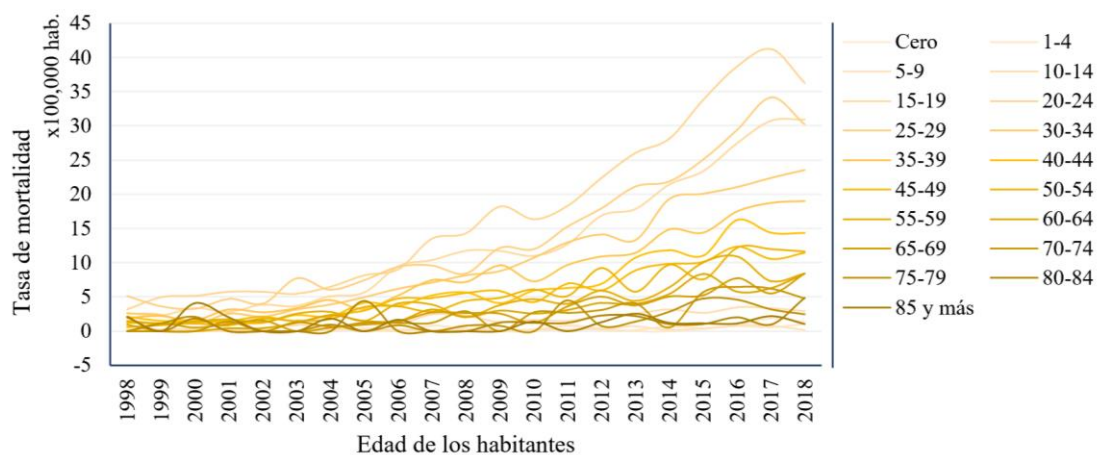
donde $q_\alpha^{(-r)}$ indica la probabilidad de que la persona en edad α se vea involucrado en un ET durante el año por una causa diferente a la causa r , es decir, la cantidad $q'_\alpha^{(-r)} = q_\alpha^{(\tau)} - q_\alpha^{(r)}$.

Ahora bien, continuando con el grupo de personas vulnerables ante ET, el caso de las defunciones en motociclistas es de especial atención debido a que la ausencia de registros en algunas partes del territorio subestima las tasas de mortalidad. Ante esta situación, una salida técnica consiste en simular

los datos que probablemente fueron omitidos con base en los registros de otros riesgos que sí se hayan registrado oportunamente. Este procedimiento suele ser muy útil, no obstante, conlleva altos costos en recursos computacionales si se desea hacer por métodos Montecarlo o *Bootstrapping* (Morgan, B. J., 2018), lo que puede solventarse mediante el uso de la hipótesis de distribución uniforme de riesgos múltiples y la aplicación de las ecuaciones de interpolación.

En la Figura 4.32 se muestra en líneas de color graduado la evolución de la tasa de mortalidad de los motociclistas por grupo etario durante el periodo 1998-2018, las tasas fueron estimadas mediante el método de aproximación basado en la hipótesis de distribución uniforme de riesgos múltiples para emplear las proyecciones demográficas de la población a mitad del año. Como puede observarse, el comportamiento cualitativo es idéntico al observado con el método de estimación directa mostrado previamente, también los valores son prácticamente iguales a los estimados con anterioridad, lo que muestra la utilidad del método de aproximación.

Figura 4.176. Evolución de la *tasa de mortalidad de los motociclistas* por grupo etario, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

4.3 Tipos de efecto

Los resultados de la sección anterior plantean la relevancia de estudiar la distribución de las defunciones como método de inferencia para explicar las asimetrías entre distintos grupos de población y los diversos tipos de riesgo que ‘compiten por ser la causa de la defunción’, así como para modelar y explicar las diferencias entre los fallecimientos por ET y las demás causas que operan sobre la población mexicana, constituyéndose así en un elemento central para verificar hipótesis, estimar el impacto de diversas intervenciones y coadyuvar a distinguir el tipo de efecto de las acciones intencionadas.

Al analizar conjuntos de datos longitudinales y espaciales que caracterizan poblaciones, es vital distinguir entre los tipos de efecto detrás de las afectaciones a la dinámica demográfica, en particular, es esencial discernir entre los efectos producidos por la *edad* de los involucrados, el *periodo* de estudio o la *cohorte* a la que pertenecen. Para abordar este problema, se requiere comparar datos específicos de la edad registrados en diferentes momentos y en correspondencia con diferentes cohortes, para lo cual se pueden emplear distintas aproximaciones para realizar el análisis Edad-Período-Cohorte (APC, por sus siglas en inglés).

Como en la mayoría de los modelos, en la elección del método influye el nivel de parsimonia al considerar la interacción de distintos factores sociales, históricos y ambientales que podrían haber afectado simultáneamente a individuos y poblaciones de individuos, sobre todo en aquellos periodos en los que los desafíos relacionados con las enfermedades, el envejecimiento y la violencia modifican la dinámica poblacional en forma sustantiva como para confundir o diluir el impacto de los ET en la mortalidad en diversas escalas.

Los *efectos de la edad* son variaciones asociadas con los grupos cronológicos de edad. Estos pueden surgir de cambios fisiológicos, modificación de la conducta, acumulación de la experiencia y muchos otras adaptaciones que se hacen presentes al afrontar amenazas, así como en la manera de conducir las situaciones de peligro y gestionar los riesgos y adversidades de la vida diaria.

Los efectos de la edad reflejan procesos biológicos y sociales del envejecimiento de los individuos y pueden representar aquellos cambios producidos por el desarrollo a lo largo de la vida. Conceptualmente, estos efectos se hacen presentes mediante las regularidades asociadas a las variaciones de edad, manteniéndose relativamente estables en el tiempo y el espacio en diversos escenarios; fenómenos típicos del efecto de la edad son la fertilidad, la escolaridad, el empleo, el matrimonio y la estructura familiar, la prevalencia e incidencia de enfermedades y de participación en eventos contingentes, así como las causas de la mortalidad.

Por su parte, los *efectos de período* son variaciones que ocurren en épocas, períodos de tiempo o años calendario que por su naturaleza logran influir en todos los grupos de edad en forma simultánea, incluso si los efectos se manifiestan con distinta intensidad o en diferente dirección. En general, este tipo de efectos abarca un enorme conjunto de eventos históricos, típicamente, todos los procesos de cambio estructural, social, económico o político, así como los factores ambientales o diversos trastornos tales como las guerras, expansiones y contracciones económicas, hambrunas y pandemias de enfermedades infecciosas, intervenciones de salud pública y avances tecnológicos.

Además, cuando los cambios en los entornos sociales, culturales, económicos o físicos pueden inducir cambios en la misma dirección para todas las personas en un intervalo de tiempo determinado, los

efectos del período se vuelven evidentes a partir de una correspondencia entre el momento de los cambios en los eventos y las condiciones sociales y epidemiológicas que influyen en los eventos asociados.

Los *efectos de cohorte* son cambios en grupos de individuos que experimentan un evento inicial como el nacimiento o el matrimonio en el mismo año. Las cohortes de nacimiento son la unidad de análisis que con mayor frecuencia se examinan en los análisis APC, debido a que una cohorte de nacimiento evoluciona compartiendo condiciones estructurales, eventos históricos, sociales y condiciones de salud, científicas y tecnológicas a las mismas edades, lo que es sumamente útil en el análisis de variaciones porque permite observar efectos específicos en condiciones relativamente controladas (Willets, R., 2004).

Por lo tanto, las cohortes de nacimiento que experimentan diferentes condiciones históricas y sociales en diversas etapas de su curso de vida tienen múltiples exposiciones a factores de riesgo socioeconómicos, conductuales y ambientales. Entre los análisis más comunes de este tipo de efecto se encuentran el estudio del cáncer, de las enfermedades crónicas y la mortalidad humana por diversos factores.

A pesar de sus bondades conceptuales y su utilidad en política pública, los desafíos planteados por el análisis APC son amplios y no siempre se resuelven fácilmente. Por ejemplo, es necesario valorar a priori si es posible y tiene sentido separar los cambios observados con el tiempo en los componentes: envejecimiento, períodos de tiempo relevantes y seguimiento de cohortes. Mediante una aproximación teórica, Glenn (2015) ha denominado a este tipo de análisis el "enigma del análisis de APC" por dos razones fundamentales:

1. *Las limitaciones de datos.* El uso de datos transversales en un punto en el tiempo, por ejemplo, el envejecimiento y los efectos de cohorte se mezclan y suelen confundirse al usar datos de panel longitudinal para una sola cohorte, por otro lado, los efectos del envejecimiento y el período también se entremezclan y confunden debido a los procesos de covariación en una serie de eventos.
2. El uso de modelos de regresión lineal convencionales que sufren errores de especificación o un problema de identificación tienen el potencial de mezclar las fuentes de variación y, por tanto, resultan incapaces de distinguir los efectos individuales de cada componente del APC.

4.3.1 Efecto edad

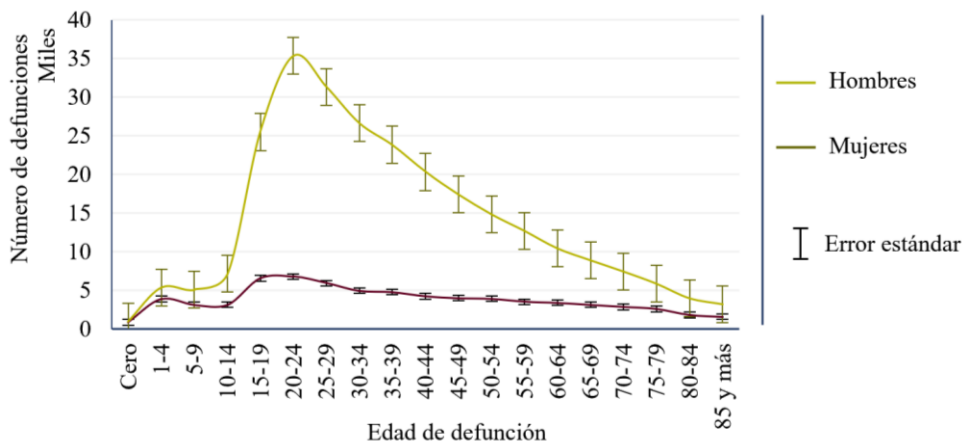
A pesar de las dificultades anteriores, por su estrecha relación con el diseño de políticas públicas, resulta de sumo interés el investigar los efectos que impulsan las variaciones en los ET, especialmente en lo que respecta a las defunciones, algo que es posible detectar mediante la modelación de la estructura de edad de las defunciones. Por ejemplo, ya se ha visto que los procesos de DT se modifican con múltiples características del espacio y el territorio, pero mantiene acotada en ciertos márgenes de variabilidad a la familia de distribuciones de la edad, lo que permite avanzar hacia el análisis de sus propiedades estadísticas, las cuales, aunque mantienen cierta estructura, podrían no ser invariantes a través del tiempo, ni del espacio.

Posiblemente, el principal punto de discusión sobre este tipo de análisis en la literatura reside en el desafío de la identificación. El problema de identificación surge de la imposibilidad de desagregar la edad, el período y los efectos de cohorte de una manera única, sobre todo, debido a su multicolinealidad perfecta: conociendo dos componentes es posible encontrar el tercero combinándolos linealmente. Por lo expuesto, generalmente se acepta que la magnitud de los efectos de la edad está dada por los efectos del periodo menos aquellos imputables a la cohorte, es decir, los efectos mantienen una condición algebraica irrenunciable:

$$\text{Efecto}_{\text{Edad}} = \text{Efecto}_{\text{Periodo}} - \text{Efecto}_{\text{Cohorte}} \quad (4.64)$$

De este modo, para reconocer el efecto edad, se puede comenzar con la estimación de la distribución general de las defunciones y su variación paramétrica. Como se ha revisado antes, la distribución de las defunciones respecto a la edad sigue una distribución de Weibull, la cual se aleja de la forma general en la que ocurren las defunciones por todas las causas.

Figura 4.177. Número de defunciones por *todas las causas de ET por sexo*, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

En la Figura 4.33 se observan las cifras anuales de las defunciones motivadas por ET desagregadas por sexo del fallecido. Como se ha visto, entre 1998 y 2018 se han registrado 337,623 defunciones por

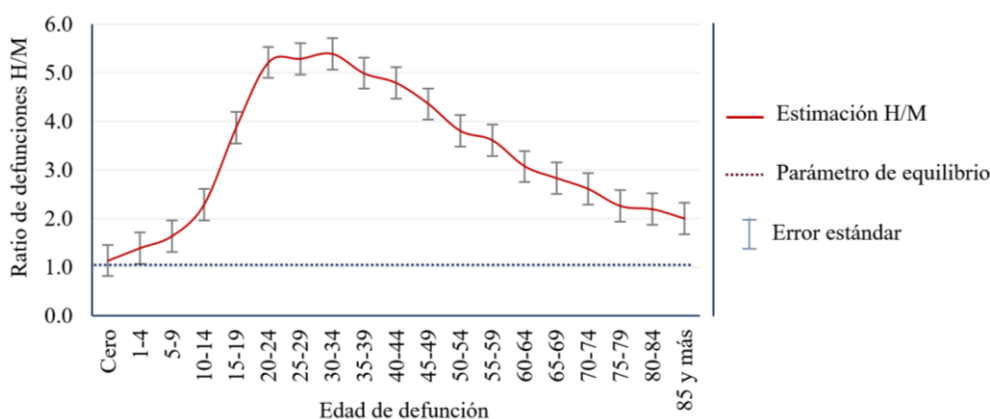
ET, de los cuales 266,489 (78.9%) han sido hombres y 71,045 (21.1%) mujeres, lo que implica que fallecen cuatro hombres por cada mujer, una estimación que no es monótona para todos los grupos etarios y que conviene analizar para diseñar estrategias que permitan abatir la brecha de género en estos índices.

Entre otras cosas, el ratio de defunciones entre hombres y mujeres permite valorar diversos fenómenos, el análisis de las variaciones de este índice en los distintos grupos etarios impulsa el reconocimiento de los efectos diferenciales de la edad en los procesos de frecuencia, letalidad y mortalidad y abre la posibilidad de plantear distintas hipótesis.

Por ejemplo, si el fenómeno de los ET afectara a ambos sexos por igual en todas las edades, se observaría un ratio constante igual a 1.0 en todos los casos. No obstante, como puede observarse en la Figura 4.34, el valor más cercano a 1.0, el ‘ratio de equilibrio’, se observa en las niñas y niños menores de 1 año, lo que es un resultado sumamente intuitivo debido a que las condiciones de vulnerabilidad, cuidado y exposición a ET a esta corta edad es muy similar en ambos sexos.

Como muestra la línea roja de la gráfica, la estimación del ratio de defunciones Hombre/Mujer crece constantemente desde el nacimiento hasta los 24 años, siendo su mayor aceleración de los 14 a los 29 años ya que, después de esta edad, el ratio permanece estable durante 10 años y comienza a descender gradualmente hasta llegar a 2 hombres por cada mujer en las personas mayores a 85 años.

Figura 4.9. Ratio del número de defunciones por sexo, 1998-2018

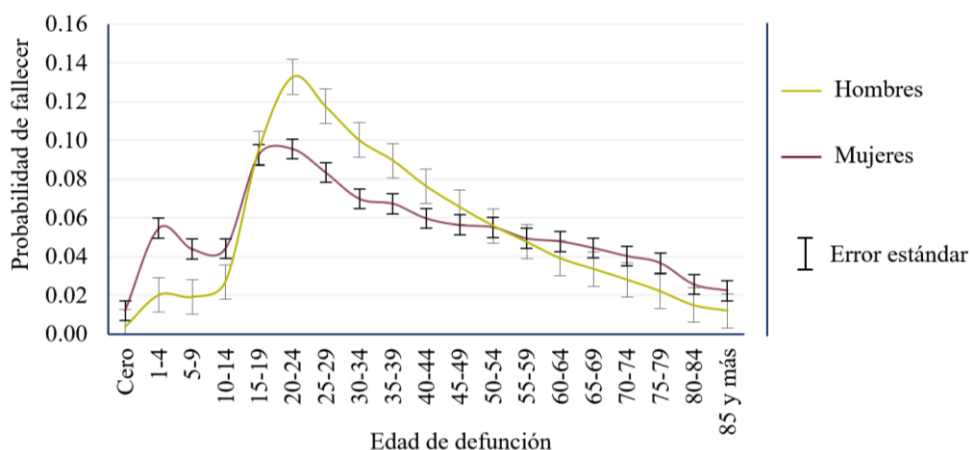


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para ampliar el análisis, en la Figura 4.35 se comparan las probabilidades condicionales de que, dada una defunción por ET, esta ocurra en alguna edad específica, la estimación proviene de la integración de las defunciones ET en el periodo 1998-2018, las diferencias entre las estimaciones permiten reconocer las diferencias del efecto edad entre ambos sexos.

De este modo, las funciones de densidad muestran que las defunciones por ET entre hombres y mujeres aparentan provenir de dos poblaciones distintas. Por ejemplo, los niños entre 1 y 14 años tienen probabilidades similares de fallecer por un ET (0.2), no obstante, este valor se multiplica por un factor de 5 para el grupo 15-19 ($p = 0.096$) y por más de 6 para el grupo de 20 a 24 años ($p = 0.133$). Por su parte, las niñas entre 1 y 4 años poseen una probabilidad de $p = 0.055$ de fallecer en un ET y el pico más alto, experimentado por el grupo de 20 a 24, alcanza $p = 0.096$ para luego comenzar a decrecer, lo que muestra que el efecto diferencial de la edad es mucho menor en las mujeres que en los hombres.

Figura 4.178. Probabilidades condicionales de defunción por ET y por sexo, 1998-2018



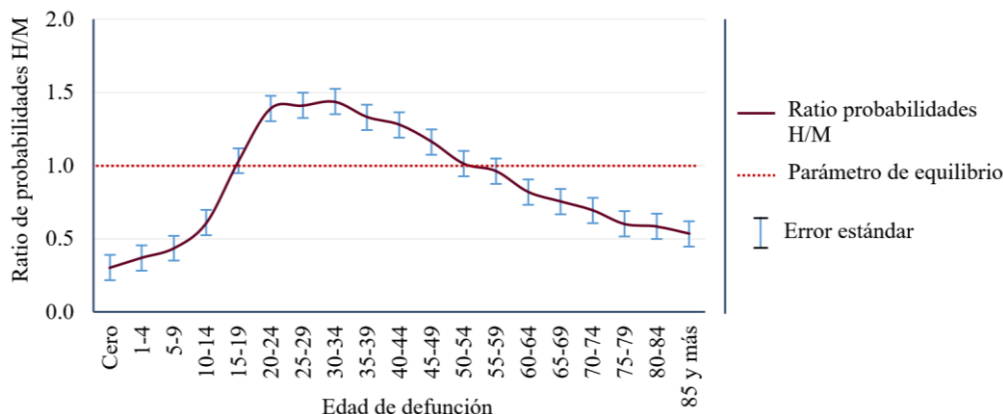
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como las diferencias en las probabilidades puntuales señalan claramente el efecto edad en ambas subpoblaciones, a lo largo de las décadas pasadas han ocurrido diversas intervenciones para abatir los ET entre jóvenes, muchos de ellos focalizados en las conductas violentas que suponen menor aversión al riesgo y consecuencias más severas en casos de ocurrencia, sin embargo, si se desea realizar intervenciones diferenciales con efectos igualadores, es necesario estimar las variaciones entre las intensidades de riesgo y sus efectos en las variaciones de las tasas de mortalidad para cada grupo etario y sexo.

La Figura 4.36 muestra el ratio Hombre/Mujer de las probabilidades de fallecer en un ET; la línea roja de la gráfica muestra cómo los hombres entre 20 y 34 años tienen una concentración de probabilidad de fallecer 40% mayor, una concentración que permanece dominada hasta los 54 años, por lo que, si ambos grupos experimentaran el mismo número de *ET-Fatal*, en los niños y jóvenes menores de 19 años sería mucho más frecuente observar mujeres que hombres muertos, mientras que de los 20 a los

54, los hombres dominarían el número de defunciones; a partir de esta edad, cada vez con mayor intensidad, las defunciones de mujeres otra vez volverían a ser dominantes.

Figura 4.179. Ratio de las *probabilidades de defunción por sexo*, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, existen múltiples explicaciones para estas asimetrías, sin embargo, podrían ser dos las más frecuentes:

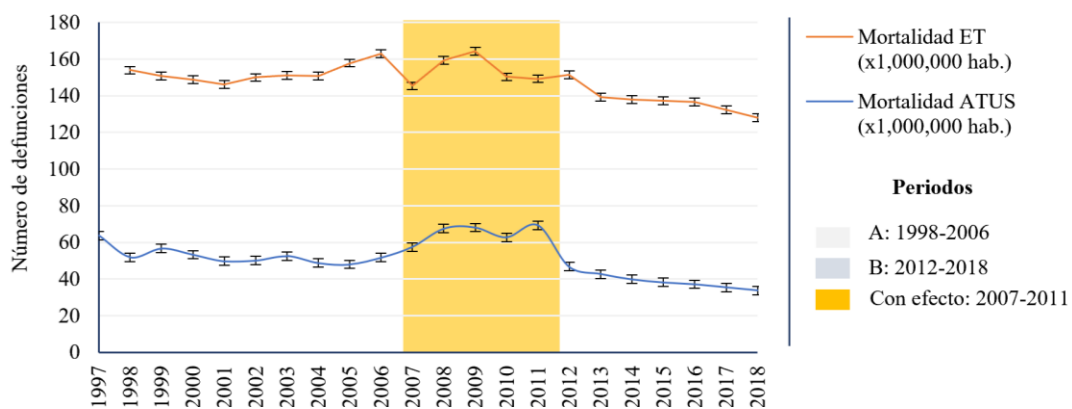
1. Históricamente, los grupos de hombres jóvenes expresan menos aversión al riesgo y sus conductas en este periodo de edad fomentan una mayor exposición mediante el inicio de la conducción de un vehículo a edades más tempranas y la aceptación de situaciones de riesgo con poca atención a las medidas de precaución. Además, el estilo de conducción con mayores velocidades puede inducir a una mayor frecuencia de manejo bajo el influjo del alcohol u otras drogas, lo que se asocia con mayor número de siniestros y mayor severidad.
2. La movilidad por actividades laborales y la responsabilidad de conducir como parte de las conductas asignadas por rol de género ha jugado un espacio relevante en la proporción de horas frente al volante en ambos sexos, promoviendo una proporción mucho mayor en hombres que mujeres que, como se ha visto, concluye con tasas de entre 70% y 90% más defunciones de hombres entre 15 y 34 años.

4.3.2 Efecto periodo

Como se ha señalado, los efectos del período son aquellos relacionados con eventos que ocurren en un punto específico en el tiempo y afectan a todas las personas de todas las edades ‘los efectos de las diferencias en los períodos de tiempo de observación o medición del resultado’ (Yang y Land, 2013), más allá de las variaciones motivadas por las distancias entre los grupos etarios.

Un ejemplo claro de un disturbio temporal es el observado en las series de tiempo de los ET y ATUS registrados en el periodo 2007-2011. No obstante, la evolución de las defunciones por ATUS y ET no han sido monótonas ni completamente concurrentes, como muestra la Figura 4.37 con sus respectivas tendencias, lo cual ya se ha mencionado anteriormente y que, siendo incluso evidente la magnitud del efecto del periodo de manera visual, éste detalle no ha llamado la suficiente atención de los especialistas en el estudio de los ET, por lo que no existe aclaración, ni consenso, sobre el fenómeno que motivó una distorsión de tal magnitud en el número de defunciones durante el periodo marcado por la franja naranja.

Figura 4.180. Evolución del número de defunciones por ET y ATUS, 1998-2018

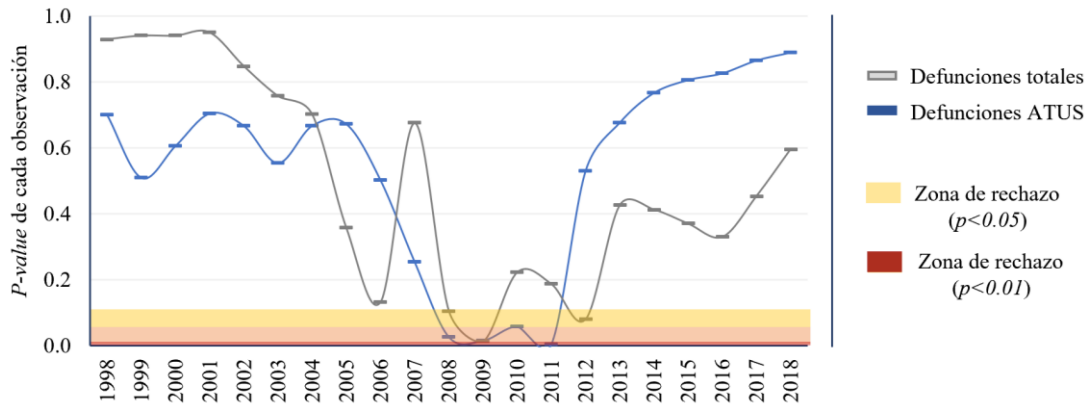


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Desde luego, una primera pregunta de investigación podría ser: ¿qué tan probable es que estos valores pertenezcan a la serie? Para responderla, es posible estimar las probabilidades de que cada observación pertenezca a la serie de tiempo de donde fue extraído. En la Figura 4.38 se muestra el resultado de este ejercicio para las series de tiempo de las defunciones totales por ET y las registradas por ATUS.

Por supuesto, para evitar la influencia del dato a evaluar, en todos los casos se excluye el año analizado como si éste no perteneciese a la serie. Lo primero que se observa es que el *P-value* de los valores registrados en el periodo 2007-2011 es bastante bajo para ambas series, resulta de especial interés que solo dos de los ET totales —2008 y 2012— y cuatro puntos de ATUS —de 2008 a 2011— se ubican en las zonas de rechazo de la hipótesis H_0 de pertenencia o nula diferencia respecto a la serie, por lo cual, para amos niveles de significancia, podría rechazarse la hipótesis de que los valores estimados en estos años pertenecen a la misma fuente o son originados por el mismo fenómeno.

Figura 4.181. *P-value* de la probabilidad del del registro, dada la serie de tiempo, 1998-2018

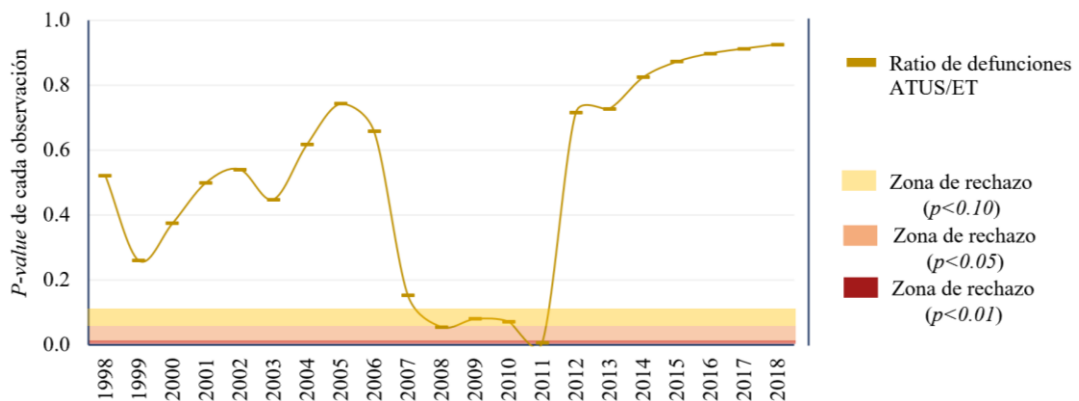


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, el mayor efecto periodo se produce en las zonas urbanas y suburbanas y aunque éste se traspasa a las defunciones totales, no es directo. Además, aunque visualmente las variaciones entre las defunciones totales por ET y por ATUS parecen coincidir, es necesario realizar la prueba de hipótesis estadística para conocer si esto es cierto. Una manera de hacerlo es analizando el ratio de defunciones ATUS/ET y sus variaciones, lo que ayuda quitar dimensionalidad a las fluctuaciones.

En la Figura 4.39 se observa el *P-value* para cada estimación del ratio y otra vez se observa que en el periodo 2007-2011 existen fluctuaciones que no parecen estar generadas por el mismo fenómeno, lo que aporta mayor evidencia al efecto de este periodo en la mortalidad por ET.

Figura 4.182. *P-value* de la probabilidad de observar el Ratio, dada la serie de tiempo, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

A partir de los resultados observados, si no se es demasiado exigente con el umbral del valor de rechazo, se podría postular que, efectivamente, los valores estimados para ATUS y el ratio de defunciones ATUS/ET no pertenecen a sus respectivas series de eventos y, por tanto, sería necesario

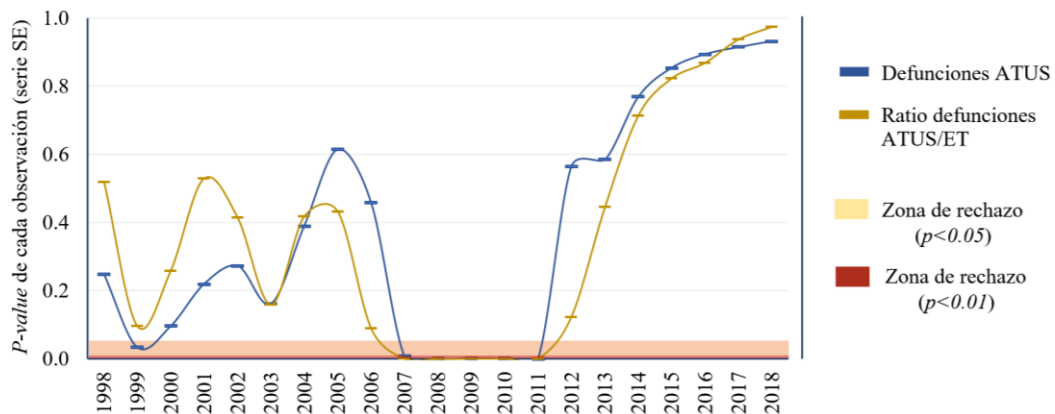
cuestionar su origen. No obstante, como con este procedimiento solo los años 2008 y 2011 se ubican por debajo de $p=0.05$, es factible afirmar que aún no existe una evidencia suficientemente fuerte para cuestionar su pertenencia y afirmar que se cuenta con un efecto periodo.

En este sentido, las evidencias sugieren continuar investigando al periodo y no a cada observación por separado, lo que puede lograr si se plantea como H_0 que el periodo de la serie en que se presenta un comportamiento atípico y su complemento son estadísticamente iguales. De este modo, si después de efectuar la prueba de hipótesis, no se logra rechazar H_0 en forma contundente, se contaría con evidencia de que los valores son pocos probables, pero factibles. El procedimiento descrito consiste en estimar los parámetros de la serie construida solamente con los datos del periodo en el que se detecta efecto; para realizar la prueba de hipótesis sobre el efecto diferencial, es necesario que las estimaciones paramétricas solo consideren dos series: la del periodo continuo en estudio, 2007-2011 en este caso, y su complemento.

Para revisar la probabilidad de pertenencia a la serie no afectada de cada año observado, se han realizado las estimaciones para todos los años con base en lo indicado en el párrafo anterior. En la Figura 4.40 se muestran los resultados de las estimaciones del P -value para cada año, teniendo como serie de referencia a la conformada por los periodos 1998-2006 y 2012-2018.

Como puede observarse, el valor para los años comprendidos en el periodo 2007-2011 son prácticamente cero, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, que indica que no existe diferencia estadísticamente significativa —sin importar el nivel de significancia— y se da paso a la hipótesis H_1 que sugiere que ambas series son distintas y, por tanto, las estimaciones derivadas de asumir que son la misma presentarán problemas en todos usos, incluyendo las estimaciones dinámicas y las predicciones.

Figura 4.183. P -value de la probabilidad de observar la estimación, dada la serie 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Bajo este mismo procedimiento, con el fin de extraer el efecto del periodo en cuestión y tratar ambos periodos como series separadas, se crearon las series *Sin efecto* (SE) a partir de las series A y B debido a los cambios de nivel observados en los valores de la Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Desagregación de las series de defunciones por ET y ATUS, 1998-2018

	Serie	Original	Sin efecto (A+B)	A	B	Con efecto
	Periodo	1998-2018	1998-2006;2012-2018	1998-2006	2012-2018	2007-2011
Defunciones	Total	342,201	256,084	139,477	116,607	86,117
	ATUS	116,548	80,066	46,944	33,122	36,482
Eventos de tránsito	Total	8,233,054	6,047,421	3,415,592	2,631,829	2,185,633
	Fatal	97,750	69,170	40,268	28,902	28,580
	No fatal	1,794,808	1,300,691	781,198	519,493	494,117
	Solo daños	6,340,496	4,677,560	2,594,126	2,083,434	1,662,936

Fuente: Elaboración del autor con base en datos de INEGI (2020).

Mediante su tratamiento como series independientes, se confirma que durante todo el periodo 1998-2018 se registraron 342,201 defunciones por ET, de las cuales 116,548 (34.1%) fueron motivadas por los 8,481,168 eventos registrados en zonas urbanas y suburbanas, mediante la ocurrencia de 97,750 *ET-Fatal*.

El número de defunciones por ET entre 1998 y 2018 es 16,295, no obstante, en la serie sin efecto es de 16,005, mientras que la serie con efecto promedia 17,223 defunciones, 7.6% más que la serie SE. En este sentido, el promedio total registrado por ATUS es 5,550, sin embargo, la serie SE de ATUS presenta un promedio de 5,004 defunciones y la serie CE 7,296, 45.8% mayor. Asimismo, al comparar los ratios ATUS/ET, la serie total posee un promedio de 34%, la serie sin efecto 31.4% y la serie con efecto 42.3%, 10.9 puntos porcentuales más, lo que completa la evidencia para indagar sobre la probabilidad de que las series SE y CE puedan provenir de la misma serie generadora.

Como es ampliamente conocido, en el análisis estadístico también se pueden realizar pruebas de hipótesis para confirmar si dos conjuntos de datos provienen del mismo conjunto. La prueba T de Student puede ayudar a plantear y resolver esta pregunta y apoyar una valoración cualitativa mediante el *P-value*, entendida como la probabilidad de que las series SE y CE provengan de la misma serie de tiempo.

De este modo, la hipótesis nula H_0 plantea que no existe una diferencia entre las series que sea estadísticamente significativa. Como el cambio entre las series va en la dirección de aumento, se lleva

a cabo una prueba T unilateral o de una cola que pueden compararse con distintos niveles de significancia estadística α . En la Tabla 4.3 se muestran los resultados para dos grupos de variables: Número de defunciones y de eventos, separados por consecuencia: *ET-Fatal*, *ET-No-fatal* y *ET-Solo daños*, así como el grupo Indicador, que agrupa los ratios de las defunciones ET/Total general, ATUS/Total general y ATUS/ET, además de la proporción de ET de acuerdo su consecuencia.

Tabla 4.3. Contraste del número de defunciones y de eventos para series con y sin efecto

Número	Defunciones x ET	Defunciones x ATUS	ATUS	ATUS Fatal	ATUS No fatal	ATUS Solo daños
T-test	0.02061	0.00037	0.00520	0.00000	0.00125	0.01107

Indicador	ET/DefT	ATUS/DefT	ATUS/ET Fatales (%)	No fatales (%)	Solo daños (%)	
T-test	0.16441	0.00001	0.00001	0.16606	0.19187	0.17978

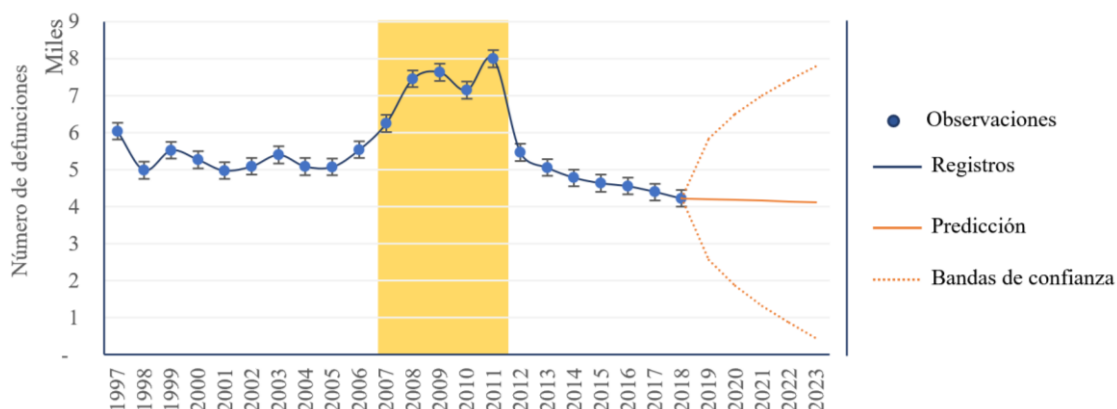
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Como puede observarse, en todas las series, el *P-value* es inferior a *0.05*, por lo que se rechaza H_0 en todos los casos. De la misma manera, como el *P-value* de los ratio ATUS/Total general y ATUS/ET es 0.00001, es fácil concluir que no se trata de las mismas series sin cometer el error tipo I, lo que además sugiere que todas las series relacionadas con ATUS son distintas, lo que confirma el efecto periodo.

Ahora bien, como se ha revisado, cuando se desea valorar el avance en ciertos objetivos como los ODS o los establecidos para el DASV, es necesario diseñar contrafactuales que den elementos de confianza sobre ‘lo que hubiera pasado sin intervención’ y lo que se observa realmente, siendo la diferencia entre ambas magnitudes el impacto de la intervención.

En la Figura 4.41 se muestra el número anual de defunciones por ATUS y, como puede verse, el efecto directo en las proyecciones es que estas exhiban una enorme varianza que provee de predicciones con bandas de confianza estadística excesivamente anchas, lo cual, sin importar el modelo, se vuelve prácticamente inservible para cualquier efecto de pronóstico, incluso aunque la tendencia promedio pareciera tener sentido e ir en la ‘dirección apropiada’, el error de medición es demasiado grande como para ser útil.

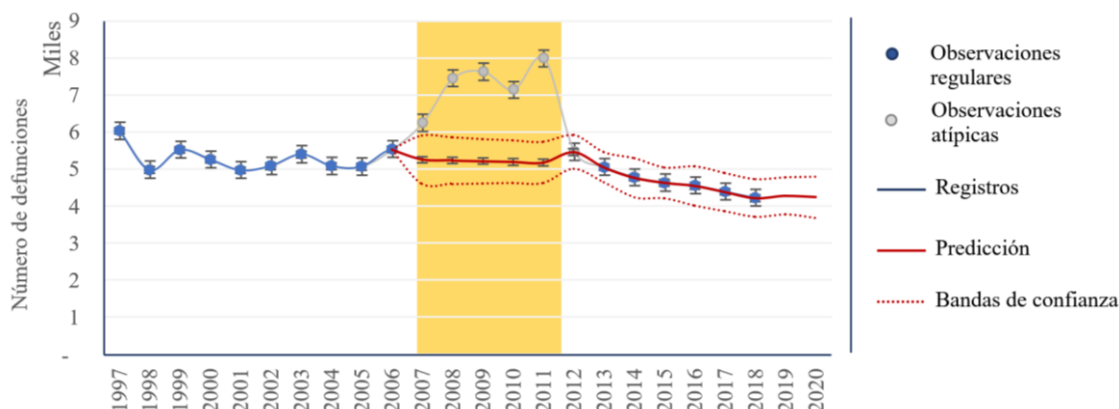
Figura 4.10. Evolución y proyección del número de defunciones por ATUS, 1998-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De nuevo, estos resultados apuntan a que los mecanismos generadores de las series CE y SE son distintos, lo que sugiere separarlas con el fin de completar la serie de defunciones de ATUS con otros métodos de imputación que permitan reconocer la tendencia e integrar los valores más probables. Al realizar este procedimiento y actualizar la proyección sobre la serie, los nuevos valores proyectados convergen a la realidad observada en los datos posteriores a la distorsión con bandas de confianza bastante angostas, lo que sugiere considerar al efecto periodo como el responsable de las variaciones observadas —sin conocer la explicación fenomenológica puntual—, y proceder a remover estos datos con el fin de que otros procesos de análisis no se vean alterados ni se afecten los indicadores asociados que utilizan los valores de esta serie, como es el caso de la letalidad, la mortalidad y el riesgo.

Figura 4.11. Ajuste del número de defunciones por ATUS en el periodo 1998-2018



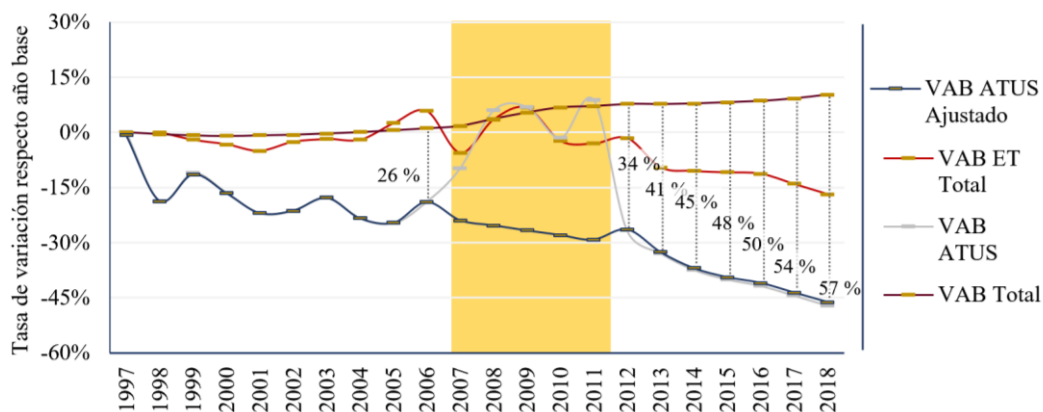
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Una consecuencia directa del reconocimiento del efecto periodo es que es posible ajustar los valores para continuar mediciones en indicadores relacionados. Por ejemplo, las variaciones de las defunciones por ATUS respecto al año base 1997 tienen una tendencia negativa en la serie 1997-2006,

la distorsión que muestra la Figura 4.43 mediante la línea gris señala un comportamiento durante 2007-2011 que sería muy difícil de explicar, sobre todo porque las variaciones en las defunciones totales por todas las causas son crecientes, lo que motiva una brecha de largo plazo.

A partir del ajuste, es fácil ver que la brecha entre las variaciones tiende a amplificarse, lo que, además de ser cierto, es sumamente intuitivo, ya que, en todos los países, las defunciones totales se han ido incrementando constantemente por otras causas asociadas con la salud en edades avanzadas, la forma cointegrada de este incremento se debe a la ampliación de la expectativa de edad de la población.

Figura 4.184. Variaciones del número de defunciones por ATUS con ajuste en el periodo 2007-2011



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

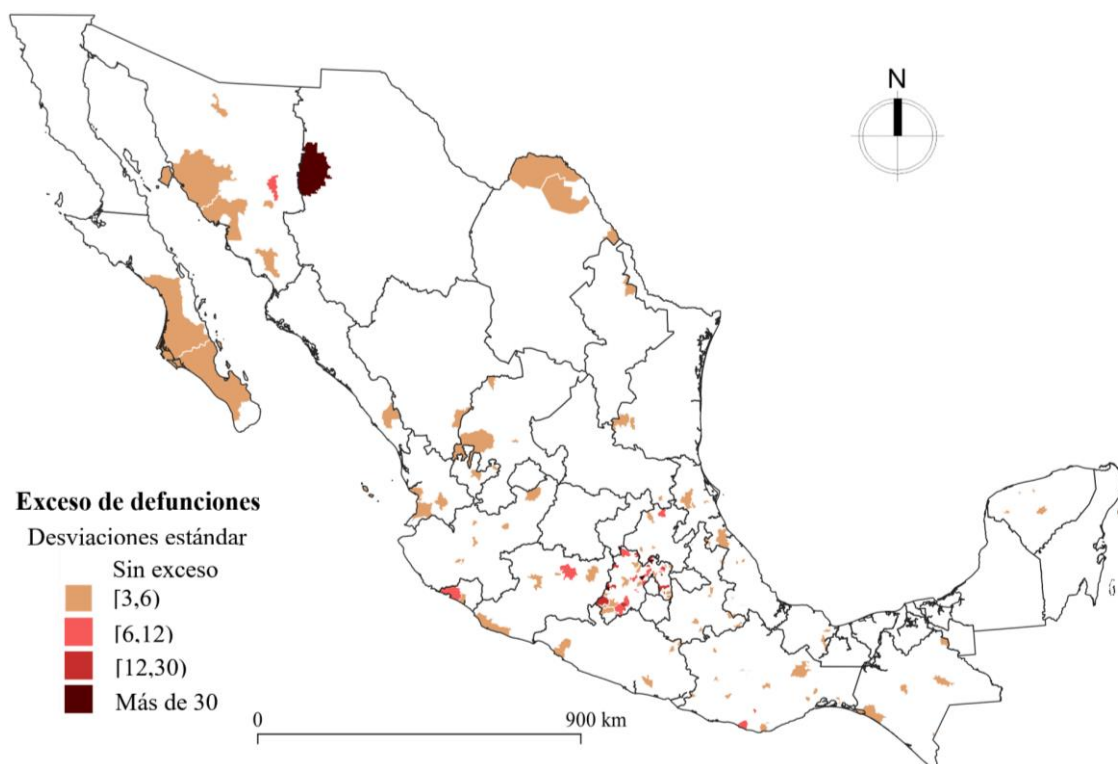
Una vez realizados los ajustes, una pregunta de investigación podría ser:

- Si existen evidencias de que la serie 2007-2011 y su complemento no provienen del mismo mecanismo generador ¿en dónde se han dado las distorsiones?

Lo que se puede intentar responder al proyectar las series en el espacio y siguiendo el mismo procedimiento de las pruebas de hipótesis. Para este caso, el análisis territorial se ha realizado a escala municipal, por ser la menor unidad de agestión de los datos que colecta e integra INEGI. Para tener mayor confianza en los resultados, se ha considerado que la diferencia es suficiente solo después de 3 desviaciones estándar respecto de su valor central, lo que resulta en un *P-value* muy cercano a 0.

En el Mapa 4.6 se muestran los resultados que indican en dónde se han presentado los datos atípicos, lo que se presenta en color graduado para indicar la magnitud de la distorsión en número de desviaciones estándar. Como puede verse, son 143 municipios los que se asocian con el efecto periodo, apenas el 5.8% del todos los municipios del país, lo que además se concentra en el Estado de México (61%), Chihuahua (12%), Michoacán (11%), Sonora (3%), Colima (2%) y Baja California Sur (1%).

Mapa 4.185. Variación de la población en el tiempo. Escala municipal, 1997-2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Estos resultados sugieren otras hipótesis sumamente interesantes, algo que, a pesar de que ya no son tema de esta investigación, es útil plantear para que puedan ser retomadas después por otros interesados en la integridad de los datos por ET. Por ejemplo:

- ¿Qué problemas existían en los espacios territoriales en los que se observan estas distorsiones?
- Durante el periodo de las distorsiones, ¿los sistemas de registro de defunciones cambiaron de metodologías?
- ¿Podrían haberse confundido los registros de defunciones por ET con otras causas?
- De ser así ¿qué motivó el error? ¿podría haber sido intencional?
- ¿Qué impactos ha tenido el reporte de esta información? ¿Se han tomado decisiones con base en estas cifras?
- De ser cierto que los datos no son los correctos ¿podrían existir beneficios o beneficiados por esta situación?

Desde luego, al profundizar en una investigación con estas preguntas, existirán muchas otras cuestiones que será necesario responder, lo que muestra, una vez más, la necesidad de ampliar los intereses e interesados en este tema dentro y fuera de los círculos académicos. Algo vital para impulsar

la calidad de los registros, así como de su resguardo, integridad, consistencia y completitud con el fin de garantizar un uso solvente y robusto de la información para la toma de decisiones basadas en evidencias.

4.3.3 Efecto cohorte

Los efectos de cohorte se derivan de las diferencias entre grupos de personas que pasan por un evento inicial común —nacimiento— en la misma unidad de tiempo —el año—. Para identificar los efectos de la cohorte, es necesario valorar la variedad de cambios que se relacionan con el tiempo, por ejemplo, experiencias similares que tienen las cohortes de nacimiento al pasar por eventos históricos y sociales a la misma edad, lo que podrían ser indicios de la intersección del conjunto de características individuales de las personas y el efecto de las influencias sociales, culturales y económicas. Asimismo, las cohortes de nacimiento cambian continuamente la composición de la población, lo que refleja distintas fuentes de cambio social (Ryder, 1965).

La importancia de distinguir los efectos de la edad, el período y la cohorte está dada por la naturaleza de la relación que estos componentes del tiempo tienen con el fenómeno. Como se ha señalado, los efectos de la edad son internos del individuo y reflejan los procesos biológicos y sociales del envejecimiento (Yang y Land, 2013). Por su parte, los efectos del período surgen de eventos y cambios que ocurren a medida que pasa el tiempo y que afectan a personas de todas las edades, por ejemplo: guerras, hambrunas, cambios de política o aumento de asesinatos.

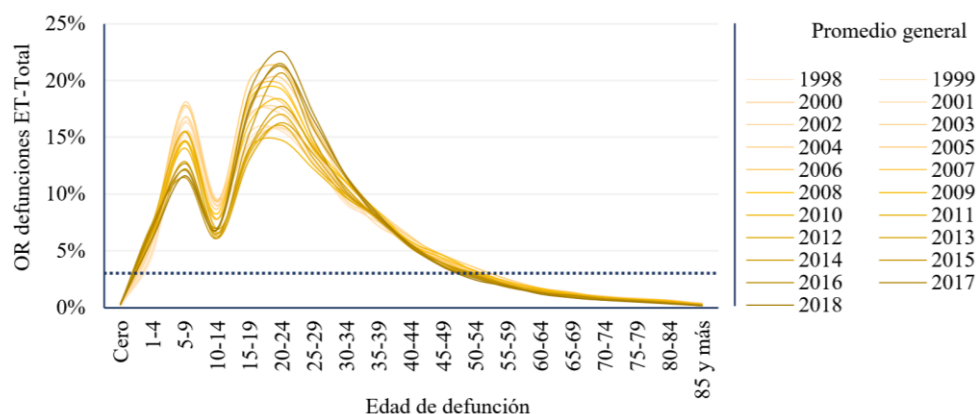
El análisis de cohortes complementa la descripción de los complejos factores sociales, históricos y ambientales que afectan simultáneamente a los individuos y las poblaciones (Yang y Land, 2013). Los cambios producidos por los efectos cohorte suelen modificar variables de exposición que son observables en la ocurrencia, en el caso de las defunciones por ET, las variaciones observadas pueden deberse a modificaciones en la conducta que motiven mayor o menor aversión al riesgo, lo que podría estimarse mediante el estudio evolutivo de las probabilidades condicionales.

En la Figura 4.44 se muestra la distribución de las oportunidades relativas de defunción por ET, dada cierta edad de ocurrencia, para cada cohorte en el periodo 1997-2018. El promedio de esta medida para todas las edades es 2.9% y tanto para los menores de un año como para los mayores de 50, la oportunidad relativa es inferior al valor promedio.

Sin embargo, en el intervalo de 1 a 49 de años, este índice supera por mucho al promedio y presenta dos modas:

1. En el grupo de 5 a 9 años, la cual alcanza 15.3% en su pico más alto de 2003 y después desciende constantemente hasta 10.4% en 2018.
2. En el grupo de 20 a 24 años, que comienza en 13.8% en 1998 y que presenta fluctuaciones con tendencia ascendente hasta alcanzar 17.5% en 2018, lo que señala cómo este grupo continúa aumentando su presencia como una de las causas más importantes de defunción a esta edad.

Figura 4.186. Probabilidad condicional de defunción por ET, dada la edad de ocurrencia, 1997-2018



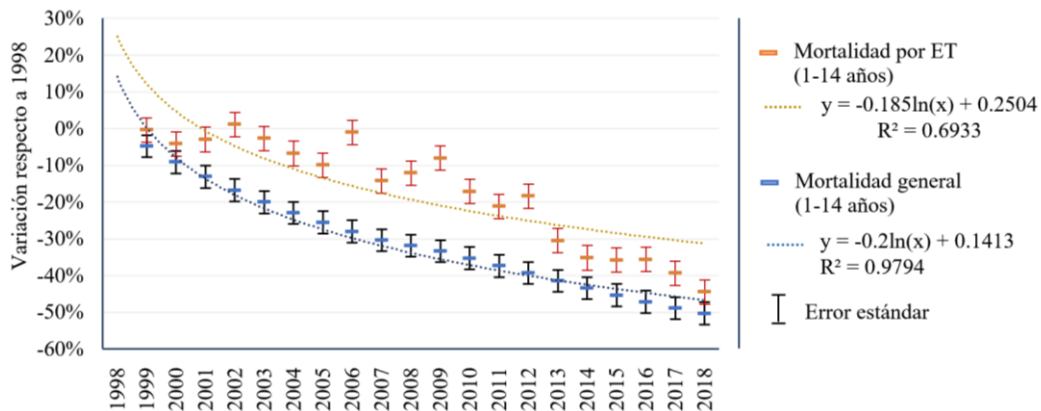
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para valorar la medida en que disminuyen las defunciones por ET a lo largo del tiempo entre los menores de edad, es posible estimar las variaciones respecto a algún año base, la primera observación de 1998 resulta especialmente útil para valorar la evolución de la serie 1998-2018 de defunciones por todas las causas y por ET.

Por su parte, en la Figura 4.45 se observa que ambas series descienden constantemente y que, en el caso de la mortalidad general por todas las causas, el número de fallecimientos en este grupo disminuye exponencialmente hasta alcanzar una reducción de 50.3%. Asimismo, el número de defunciones por ET también decrece exponencialmente y acumula una reducción de 44.5%, con variaciones menos monótonas, pero con una marcada tendencia a la baja.

La información provista por el gráfico anterior complementa las medidas de cambio motivadas por el efecto cohorte y brinda elementos para diseñar y establecer los objetivos de reducción de defunciones por ET con la posibilidad de controlar las distintas inercias, lo que a su vez permite realizar pronósticos con altos niveles de confianza mediante un modelo que recoja la dinámica temporal y cuyos parámetros puedan ser utilizados como referencia para realizar comparaciones en distintas escalas territoriales.

Figura 4.187. Variación de las defunciones totales y por ET respecto año base, 1998- 2018

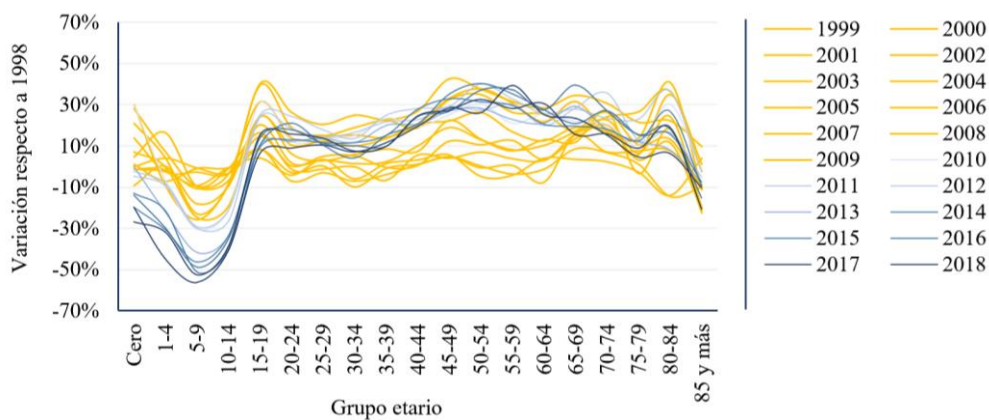


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Ahora bien, para estimar en qué medida las defunciones por ET han disminuido su representación proporcional en el total o si se están alcanzando algunas de las metas de los ODS, también es necesario realizar estimaciones sobre cortes transversales y analizar las trayectorias de las distintas series anuales con el fin de estimar sus tendencias.

En la Figura 4.46 se muestran los resultados de llevar a cabo un procedimiento variacional, lo que se representa mediante dos conjuntos de colores graduados: las líneas en amarillo corresponden al periodo 1998-2008 y las azules al periodo 2009-2018, las cuales muestran un importante cambio respecto a 1998, ya que, en el año 2018, los menores de 1 año exhiben una disminución de 25.4% y los de 1 a 4 disminuyeron 48.7%; mientras que en el grupo de 5 a 9 el cambio fue de de -59.2% y se observa una variación de -44.7% en los de 10 a 14 años, lo que confirma los efectos cohorte ya mencionados.

Figura 4.188. Variación en el riesgo de defunción por ET por grupo etario, 1998- 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

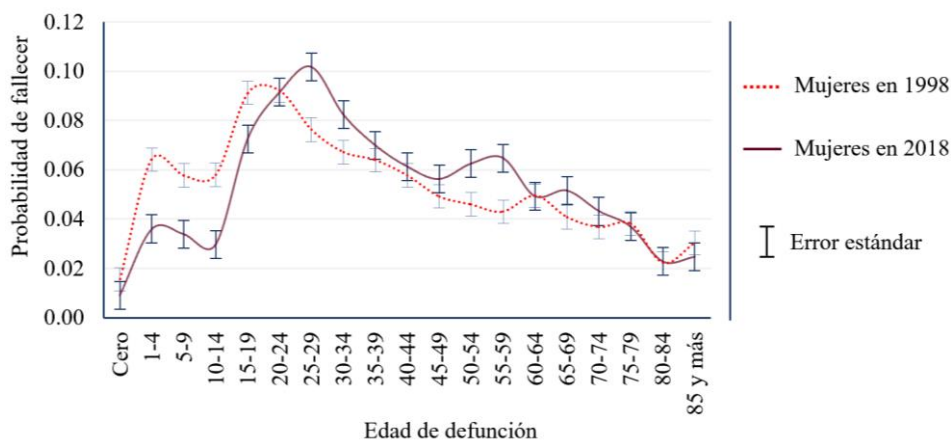
Una de las preguntas más frecuentes en el ámbito de rendición de cuentas sobre igualdad y equidad de género es la relación de defunciones entre los sexos (Milosavljevic, V., 2007; Ruiz Cantero, M. T., 2020). La relación entre los vectores de defunciones por edad para cada sexo muestra en qué medida la distribución del riesgo por edades es semejante entre los sexos. Por ello, al estudiar la interacción entre los vectores

$$\overrightarrow{\mathcal{D}_{\alpha_t}^H(\varepsilon)} = (\mathcal{D}_{0_t}^H(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\alpha_t}^H(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\omega-1_t}^H(\varepsilon)) \text{ y } \overrightarrow{\mathcal{D}_{\alpha_t}^M(\varepsilon)} = (\mathcal{D}_{0_t}^M(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\alpha_t}^M(\varepsilon), \dots, \mathcal{D}_{\omega-1_t}^M(\varepsilon))$$

a través del tiempo, se estudia también la evolución de las cohortes por sexo.

En la Figura 4.47 se muestra la comparación de las estimaciones de las probabilidades marginales de defunción de mujeres por ET con base en la edad para los años 1998 y 2018. A pesar de que ambas distribuciones empíricas muestran características similares, en la gráfica aparece de nuevo la reducción de las probabilidades en los menores de 14 años —de aproximadamente a la mitad—, con su posterior aumento por compensación en edades posteriores y la eventual equiparación a partir de los 75 años.

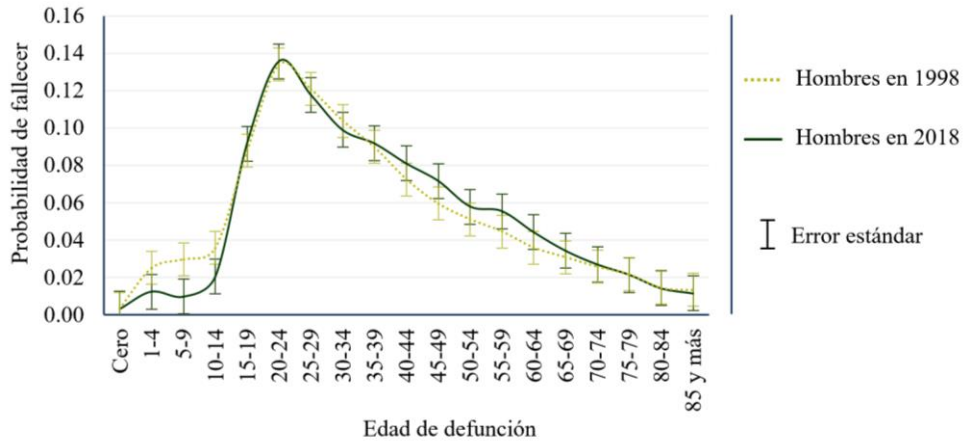
Figura 4.12. Probabilidades marginales de defunción en *Mujeres*, por grupo etario, en 1998 y 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

De la misma manera que las mujeres, los hombres han logrado disminuir a la mitad las probabilidades de defunción en los menores de 14 años, aunque han aumentado ligeramente las probabilidades en aquellos con edad comprendida entre 39 y los 69 años, confirmando el efecto del cambio de cohorte. En este sentido, es relevante notar que las estimaciones respecto a 1998 siguen esta tendencia de manera mucho más marcada que las mujeres, lo que podría deberse a la magnitud de las cifras —que al ser números más grandes permiten una mayor variabilidad y aglutinamiento—, y no a un fenómeno explícito.

Figura 4.13. Probabilidades marginales de defunción en *Hombres*, por grupo etario, en 1998 y 2018

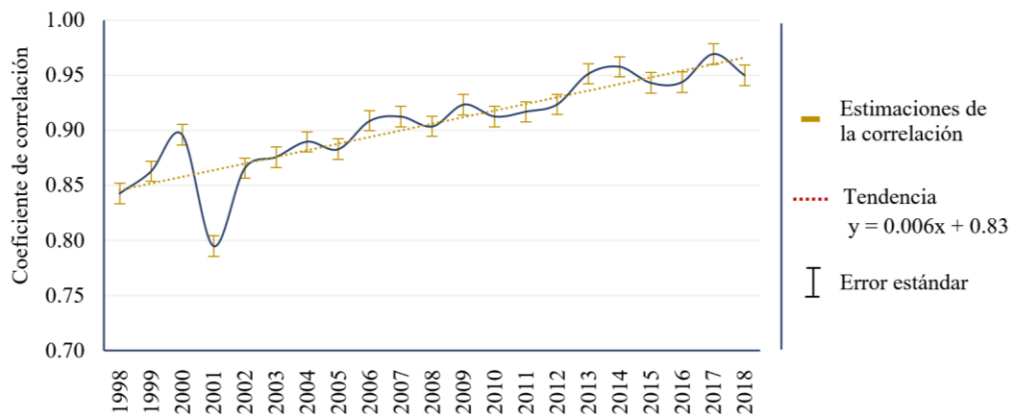


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Para deducir la concurrencia de la distribución de las defunciones por ET entre los sexos, en la Figura 4.48 se muestran las estimaciones del coeficiente de correlación a lo largo de la serie 1998-2018. Como puede verse, el coeficiente posee una tendencia ascendente y tiende a 1 —el valor de correlación perfecta—, conforme pasan los años, sugiriendo que la edad de participación y defunción por ET es cada vez más parecida, lo que coincide con otros indicadores sociales sobre igualdad.

Este resultado es notable porque apoya la hipótesis de que las mujeres y hombres de las nuevas cohortes comparten los riesgos de manera más homogénea y de que las brechas entre las defunciones son cada vez menos amplias.

Figura 4.14. Evolución de la correlación entre las defunciones por ET por sexo y edad, 1990- 2018



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

4.4 Desafíos ante los ODS

El que, a pesar de las evidencias, la escasez de recursos y el complejo escenario nacional que ya permeaba en 2010, las secretarías de Salud y de Comunicaciones y Transportes aceptaron las metas propuestas por la Asamblea de las Naciones Unidas sin ninguna discusión o análisis técnico (Híjar et al, 2018), a partir de la cual emitieron la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, con la afirmación de que se encontraba ‘alineada a los 5 Pilares de Acción del Plan Mundial por la seguridad vial de Naciones Unidas’ y lograron la adhesión de la Conferencia Nacional de Gobernadores (CONAGO) (SCT; SSA, 2011).

Desde luego, las acciones oficiales produjeron mayor visibilidad del tema y motivaron la creación de organizaciones en diversos ámbitos de la administración pública y privada para diseñar y poner en marcha múltiples programas, sistemas, acciones e intervenciones en torno a los ET (Pérez-Núñez R H. M.-S., 2012). En consecuencia, la investigación en materia de transporte también aumentó y logró que se impulsaran algunas medidas relevantes (Pérez-Núñez R. et al, 2013), por ejemplo, se estableció un límite de velocidad en varias ciudades del país, tales como Monterrey (Estado de Nuevo León), Guadalajara y Zapopan (Estado de Jalisco), Los Mochis (Estado de Sinaloa) (Coria, 2016) y en la Ciudad de México lo que aún no arroja resultados concluyentes, pero permitirá comparar resultados en el corto y mediano plazo (Rizzi LI, 2011; Chandran A, 2014).

A pesar de las buenas intenciones y las acciones derivadas de la adhesión a una iniciativa global demandan un seguimiento puntual y sistemático del estado de la situación y su evolución con el fin de valorar el impacto de las medidas que se han llevado a cabo durante esta década. Sin duda, esta es la única manera de honrar los compromisos adquiridos y rendir cuentas a los habitantes de un país que, año con año, pierde a miles de personas en ET, muchos de los cuales podrían evitarse, y sostiene un sistema de salud que recibe impactos financieros que impactan su viabilidad en el largo plazo.

A lo largo de este documento se ha mencionado constantemente el deber del gobierno de disminuir los niveles de mortalidad asociadas a los ET, así como controlar y resarcir su enorme impacto en la calidad de vida de sus habitantes. Dentro de esta tesitura, se ha mencionado con cierta frecuencia a los ODS como un referente de atención debido a que las autoridades mexicanas han refrendado sus responsabilidades ante los organismos multilaterales mediante el compromiso de atender el ODS-3, en particular el numeral 3.6, que señala: ‘Para 2020, reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo’.

De acuerdo con algunos autores (Cervantes-Trejo, 2016; Híjar et al, 2018; Sánchez-Restrepo H. C., 2019), México ha avanzado hacia la meta global mediante la prevención potencial de más de diez mil

muerres entre 2011 y 2015, lo que ‘se refleja principalmente en una disminución en el número de muerres de ocupantes de vehículos de motor’ (Híjar et al,). No obstante, estas cifras se han explorado y contrastado poco con otras investigaciones debido a que la magnitud del fenómeno sigue siendo apabullante y las acciones derivadas de las evidencias han sido bastante austeras y efímeras, lo que ha mantenido a sus autoridades con un perfil bastante discreto y resultados generales con un impacto muy bajo político y mediático.

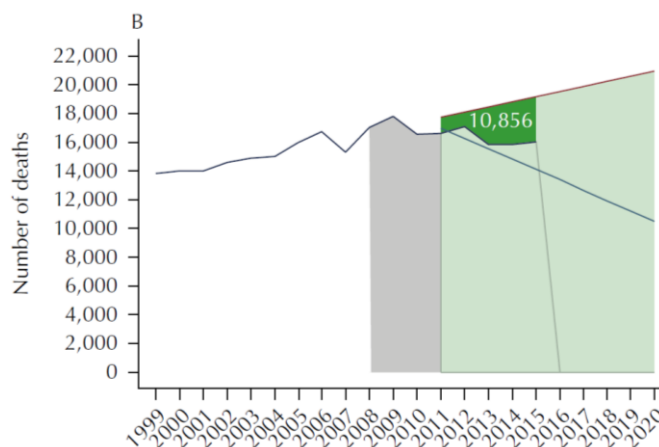
En este sentido, a pesar de que han nacido múltiples iniciativas para atender los ODS en el tema de los ET, de que varias de ellas han sido apoyadas por la Unesco y de que los objetos de investigación sean sumamente apasionantes, existen diversas razones para que este no sea un tema en el que los investigadores cuantitativos enfoquen sus esfuerzos, entre las que destacan:

4. Diversidad de protocolos de registro de los ET por parte de las autoridades y todos los técnicos involucrados en los diferentes niveles de gobierno.
5. Ausencia de protocolos de medida que garanticen que los métodos de estimación y las métricas nacionales midan las variables en forma íntegra a lo largo del tiempo y el territorio.
6. Falta de acuerdos sobre los indicadores sintéticos que pueden brindar información integral sobre los fenómenos viales y su impacto en los diversos aspectos de la salud, la economía, la productividad y otras relacionadas con los ET.

Con el fin de ‘Analizar el avance hacia el cumplimiento de la meta esperada en medio del Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020 en México y sus estados’, Híjar et al (2018) realizaron en 2018 las proyecciones de las series de tiempo oficiales a nivel nacional y estatal hasta el año 2020. Para valorar los resultados de su modelo, excluyeron 12 meses de observaciones con el fin de realizar el contraste entre las proyecciones de su modelo y los valores observados. Una vez validados los datos, se sumaron las diferencias para estimar el número de ‘defunciones evitadas’.

Las conclusiones del estudio indican que ‘México está avanzando, acercándose a la meta propuesta, que se traduce en 10,856 muerres potencialmente evitadas en el quinquenio 2011 a 2015’, lo que constituye una afirmación optimista que merece algunas reflexiones. La Figura 4.50 fue tomada del artículo mencionado y muestra claramente el argumento de las conclusiones: las 10,856 defunciones evitadas durante el periodo 2011-2015 se deben a un conjunto de cambios con efectos observables, los cuales continuarán acumulando un número importante de vidas salvadas en la segunda mitad de la década, por lo cual México podría cumplir en algún momento los objetivos previstos y evitar el sufrimiento a decenas de miles de familias, además de aliviar la enorme carga social y financiera producidas al sistema de salud por los ET.

Figura 4.189. Proyección de defunciones por ET para 2010-2020 con base en experiencia 1999-2010



Fuente: Tomada de Híjar (2018).

El razonamiento que subyace al número de defunciones evitadas es que existe una tendencia en el número de defunciones que, de alguna manera, si no existiesen acciones para contrarrestarla, continuaría evolucionando establemente de acuerdo con las cifras observadas previamente al inicio de las acciones motivadas por el DASV. Bajo este argumento, la *tendencia creciente* es el elemento central de análisis y, por tanto, toda desviación a su evolución más probable es susceptible de ser considerada un efecto de alguna acción o suma de acciones que, intencionadas o no, modifican los resultados del proceso de mortalidad, lo que se observa claramente en el número total de defunciones registradas.

A partir de lo anterior, el núcleo del problema de medición se reduce a la especificación del problema y consiste en hallar el ‘mejor modelo’ posible para representar a la serie de tiempo con el fin de conocer su evolución más probable. De este modo, la diferencia entre lo observado y lo esperado se convierte entonces en las cifras de análisis, las cuales pueden gestionarse en forma directa como números explícitos. De hecho, en el estudio en comento, los autores aclaran que el objetivo central es modelar explícitamente la serie de muertes observadas a lo largo del tiempo y su tasa correspondiente empleando técnicas estadísticas, por lo cual el objetivo principal reside en estimar la mortalidad por ET en un período de 10 años, considerando la información observada entre 1999 y 2010, colocando un énfasis especial en las predicciones realizadas por el modelo (Híjar, 2018).

En la Figura 4.51 se muestran los datos de los resultados del estudio en comento, su reproducción se hizo mediante la misma especificación funcional y paramétrica de la ecuación y la implementación de algoritmos semejantes que llevan a los mismos números ya publicados, lo que además cuenta con la ventaja de que se han incorporado los datos más recientes, lo que potencia la posibilidad del contraste. Las proyecciones se realizaron mediante un proceso ARIMA con parámetros AR(1), S(12), MA(1 12)

sobre una serie de tiempo con periodicidad mensual; la selección del modelo ‘que mejor describía los datos’ se realizó utilizando el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés).

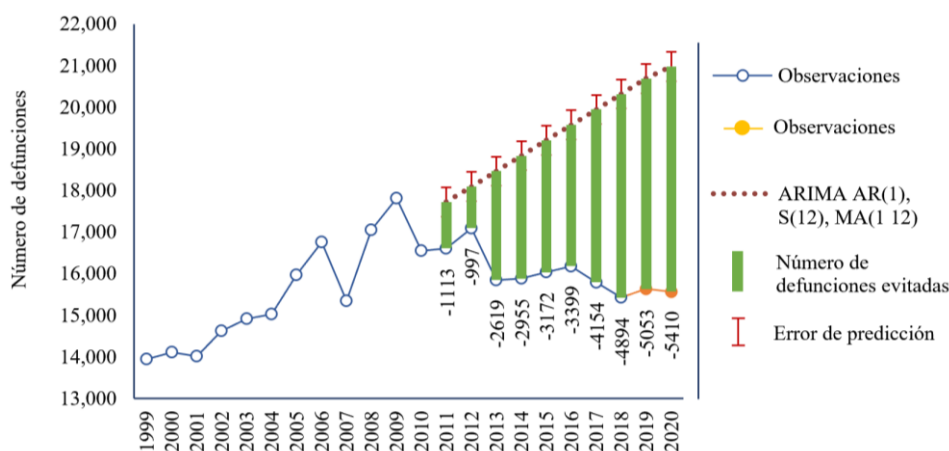
Bajo este modelo, se obtuvieron resultados que pronostican que la serie de tiempo tendrá una evolución creciente y, como en el momento de realizar el análisis se contaba con datos hasta 2015, la estimación del número de defunciones evitadas se realizó para cinco años, alcanzando un total de 10,856. Al contar con los datos de las defunciones por ET hasta 2018 y proyectar los años 2019 y 2020 con base en los datos actualizados, es posible estimar el número de vidas salvadas en cada año para un periodo más amplio —y el total para esta década— con el fin de revisar la brecha entre las defunciones previstas al inicio de la década y lo observado al final.

En la Figura 4.51 se presentan los datos de la Figura 4.50 en tres series:

- 1) las defunciones registradas a nivel nacional entre 1999 y 2015,
- 2) las proyecciones dadas por el modelo en el periodo 2015-2020, y
- 3) los valores más probables para 2020, dada la serie corregida en sus puntos atípicos registrados durante el periodo 2007-2011.

Como se ha señalado, en los primeros cinco años del DASV se estima una disminución de 10,856 defunciones respecto a lo pronosticado; bajo esta misma secuencia de argumentos, de acuerdo con el gráfico, en el periodo 2016-2020 se han evitado otras 22,910 defunciones, logrando una disminución acumulada de 33,766, el equivalente a dos años completos de defunciones por ET, lo que brinda amplias esperanzas sobre la posibilidad de controlar y disminuir el fenómeno.

Figura 4.190. Número de defunciones evitadas, experiencia 1999-2010 y proyecciones 2011-2020



Fuente: Elaboración del autor con base en Híjar (2018) y a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Al no existir un registro detallado sobre los factores que concurren en los ET y los niveles de morbilidad y mortalidad que producen, así como la ausencia de estudios de impacto rigurosos sobre las acciones de política llevadas a cabo en materia de transporte, es posible elaborar múltiples argumentos para explicar esta disminución en la mortalidad sin que alguno de ellos sea necesariamente cierto, por ello, es necesario profundizar en la evolución de la exposición y vulnerabilidad de los tres tipos de involucrados en ET más notorios: ocupantes de vehículos de motor, motociclistas y peatones.

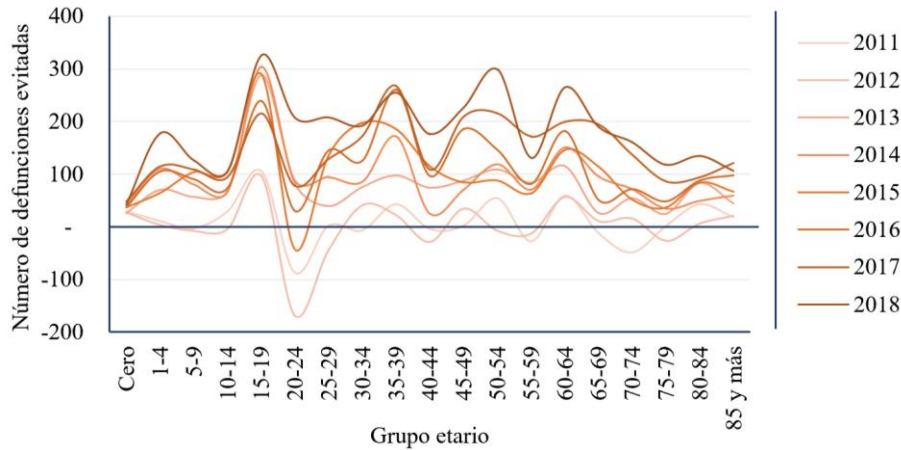
Como se ha visto, los altos niveles de defunción se encuentran asociados con la edad y, en algunos casos caracterizan a los tipos de involucrados, lo que sugiere estudiar las variaciones en el número de defunciones para cada año con el fin de generar una tipología de defunciones por ET y brindar atención focalizada, lo que conviene hacerse en relación con los parámetros de algún año base y un método de contraste que permita comparar las estimaciones del número de muertes esperadas en cada edad a tasa de mortalidad constante y suponer que estas fuerzas permanecen invariantes durante los siguientes años. Bajo este procedimiento, sería posible contrastar si las intensidades de los procesos de riesgo se han modificado y si las dinámicas por edad han variado significativamente conforme ha avanzado la década.

Desde luego, la esperanza de salvar vidas es un motor muy potente que puede movilizar recursos materiales y talento humano especializado. No obstante, dado que las defunciones evitadas no se distribuyen homogéneamente a través de los años ni menos aún entre las edades, resulta bastante útil distinguir en qué periodos y edades han ocurrido los mayores avances con el fin de comprender la fuente de las variaciones en las defunciones y, sobre todo, si estas pudiesen atribuirse a una menor exposición o vulnerabilidad, o incluso a la interacción de ambas sobre el sistema.

En la Figura 4.52 se muestra el número de defunciones evitadas para cada grupo etario con efectos separados por año. En los años 2011, 2012 y 2015 se registran excesos de mortalidad en los jóvenes entre 20 y 24 años, al igual que en los adultos mayores a 69 años, las cuales desaparecieron a partir de 2013. Otro aspecto que resulta de interés en el gráfico es que, conforme pasa el tiempo, la variación entre lo observado y lo esperado es cada vez más negativa, lo que se traduce en un mayor número de defunciones evitadas, algo que se expresa con mayor intensidad en los jóvenes entre 15 y 19 años y entre los adultos con edad entre 30 y 60, especialmente en los años 2016, 2017 y 2018.

Asimismo, también resulta relevante que los niños menores a 5 años también redujeron su participación en ET y las respectivas defunciones, lo que está relacionado principalmente con los peatones y no como ocupantes de vehículos, como ya se había señalado previamente.

Figura 4.191. Número de defunciones evitadas con tasa de mortalidad ET-2010, por grupo etario

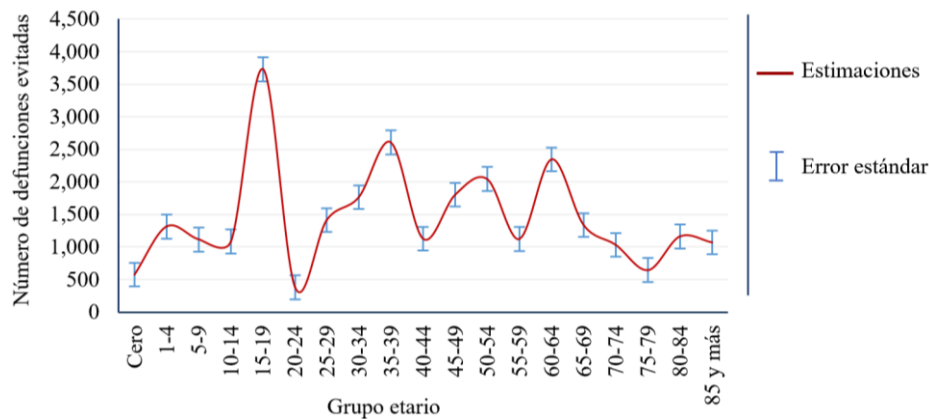


Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Siguiendo el procedimiento descrito, el número de defunciones evitadas se puede estimar para cada grupo poblacional con base en los modelos para pronosticar series de tiempo que mejor ajusten y, después, mediante las ecuaciones provistas por la distribución de los riesgos competitivos, integrarlas a lo largo de un periodo de tiempo con el fin de sintetizar su evolución.

En la Figura 4.53 se muestra el número de defunciones que potencialmente se han evitado entre 2011 y 2018, desagregadas por edad, con sus respectivos errores estándar. Mediante la línea roja se estima que se han evitado 27 mil defunciones y también se verifica que el grupo de jóvenes entre 15 y 19 años es en el que se han evitado el mayor número de defunciones (3,729), seguido de las personas entre 35 y 39 años (2,606) y las de 60 a 64 años (2,346).

Figura 4.192. Número acumulado de defunciones evitadas con tasa de mortalidad ET-2010



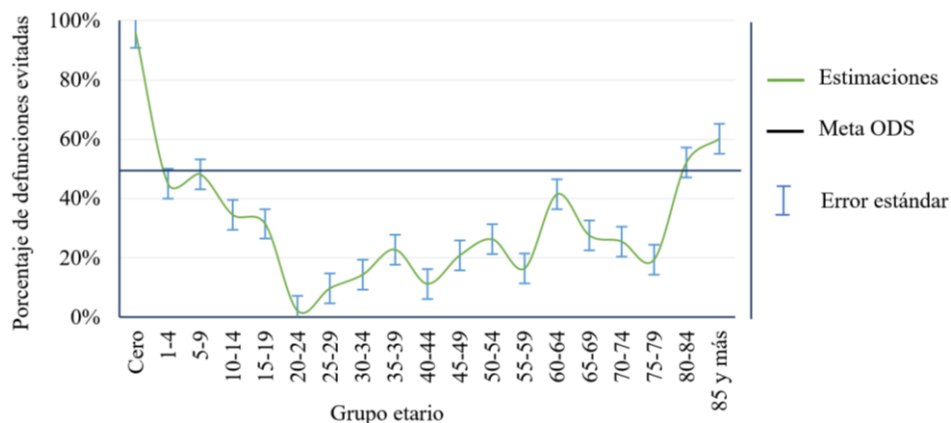
Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

Otro de los aportes de las métricas derivadas del modelo es que podrían coadyuvar en el establecimiento de una métrica estandarizada que permita comparar los avances en el ODS-3. De este modo, las autoridades y equipos técnicos podrían proponer análisis similares a los efectuados en esta sección, a partir del cual, tanto autoridades como investigadores, podrían contar con conclusiones que sintetizen su narrativa y les permitan brindar evidencias sobre la medida en que se van cumpliendo los objetivos, así como proponer metas cuantitativas que den cuenta del tamaño del desafío que aún queda por afrontar.

Para evaluar en qué medida los distintos grupos poblacionales se acercan a los ODS, también sería muy útil establecer parámetros que permitan aproximarse sucesivamente a las metas. Por ejemplo, si se acepta la meta de ‘reducir las defunciones por ET a la mitad’ (ONO, 2016), bastaría utilizar las estimaciones realizadas mediante modelos como el empleado aquí que permitan fijar los valores centrales de las proyecciones para después estimar los porcentajes de defunciones que se han evitado en cada grupo, lo que permitiría realizar intervenciones expuestas y garantizar el cumplimiento de los compromisos.

En la Figura 4.54 se muestra el resultado de este ejercicio para la meta 3.6 del ODS-3 utilizando las proyecciones previas mediante el modelo ARIMA en el periodo 2011-2018.

Figura 4.193. Porcentaje de defunciones evitadas por grupo etario, proyecciones 2011-2020



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

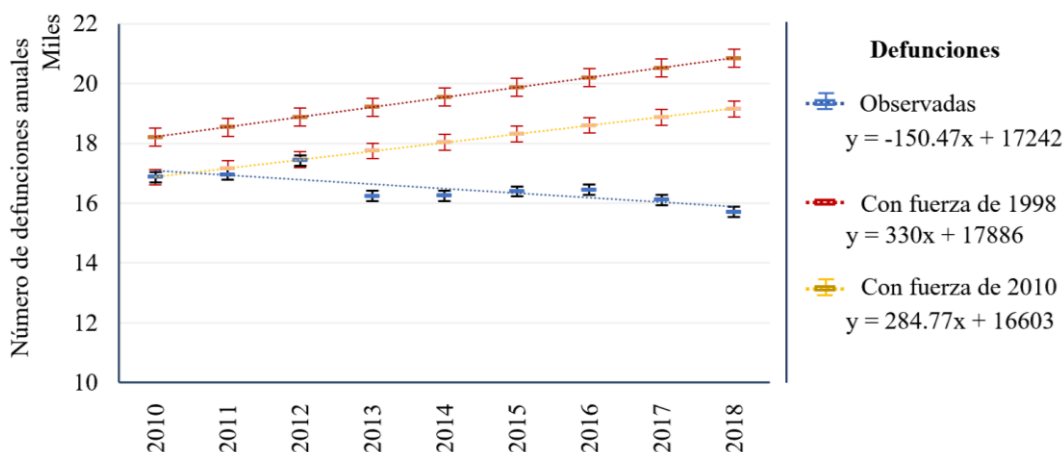
Como puede verse, en algunos grupos etarios ya se han cumplido las metas, por ejemplo, las defunciones de menores de 1 año por esta causa casi han desaparecido en los años más recientes y los adultos mayores de 80 años superan el 50% fijado. Por su parte, los niños entre 1 y 9 años se ubican muy cerca de cumplir la meta de 50%, las personas entre 60 y 64 años están sobre el 40% y los jóvenes entre 15 y 19 han superado el 31%. Por lo contrario, las personas más productivas se encuentran lejos

de cumplir las metas, siendo los jóvenes entre 20 y 24 años los más alejados, ya que apenas han logrado evitar el 2% de las defunciones.

Desde luego, si la idea de estandarizar las métricas a nivel global fuera tomada en serio y cada país siguiera una metodología estable para el cálculo de sus objetivos, rindiendo cuentas de manera válida y confiable con el fin de abatir la mortalidad, sería absolutamente necesario establecer algunos acuerdos, entre ellos, el valor de referencia de las fuerzas de mortalidad, ya que, como se ha visto, la intensidad de las fuerzas de mortalidad de los riesgos competitivos varían en el tiempo y el espacio, lo que modula la intensidad de los gradientes.

Para mostrar el impacto de no estandarizar las métricas en el cumplimiento de metas, en la Figura 4.55 se muestran las proyecciones del número de defunciones anuales de acuerdo con dos fuerzas de mortalidad: 1998 y 2010, lo que se acompaña de los datos observados hasta 2018. Como puede verse, los resultados de las estimaciones indican que, de haber continuado la dinámica de mortalidad de esos años, el número de defunciones hubiera sido mucho mayor que la observada, sobre todo si hubiera predominado la intensidad de 1998, con la cual en 2020 alcanzaría 20,844 defunciones, 5,140 más de las observadas, mientras que con la tasa 2010 serían 3,446 las defunciones evitadas, mostrando ambos casos una tendencia creciente, lo contrario de lo observado, lo que se asocia con la hipótesis de que se ha logrado revertir la tendencia, por lo que, más allá de la velocidad de los avances, el país camina en la dirección adecuada para cumplir con los desafíos planteados mediante por el ODS-3.

Figura 4.194. Número de defunciones evitadas con base en distintas proyecciones para 2011-2020



Fuente: Elaboración del autor a partir de estimaciones propias con base en datos de INEGI (2020).

El análisis de la brechas entre las defunciones esperadas y las observadas es uno más de los aportes conceptuales que este abordaje ofrece para el estudio analítico y estadístico de los ET. Como el

fenómeno se aborda desde un enfoque de realizaciones aleatorias regidas por leyes de distribución, las cuales interactúan con las características en el espacio y el tiempo en el que circulan los involucrados, es posible inferir las características colectivas asociadas con la vulnerabilidad y exposición que modulan la intensidad de la frecuencia y severidad de las ocurrencias. Ante estos argumentos, quedan pocas explicaciones plausibles sobre la ausencia de indicadores globales en esta meta que no involucren argumentos de corte político.

Conclusiones

‘No es cierto que todo tiempo pasado fue mejor. Lo que pasaba era que los que estaban peor todavía no se habían dado cuenta.’

Joaquín Salvador Lavado Quino. *Mafalda* (1979)

La muerte no se reparte como si fuera un bien.

Nadie anda en busca de tristezas.

Juan Rulfo

Discusión

Durante los últimos años, el Decenio de Acción por la seguridad Vial impulsó diversas investigaciones en todo el mundo sobre los eventos denominados ‘accidentes de tránsito’, especialmente sobre su consecuencia en la salud y la vida de las personas. A pesar de los enormes esfuerzos y múltiples iniciativas globales, el panorama en este 2020 no luce tan alentador, ya que las evidencias disponibles sobre el cumplimiento de los objetivos planteados en la Agenda 2030 muestran que las acciones emprendidas en cada país no han logrado ‘controlar y disminuir el número de defunciones en todo el mundo’, ni mucho menos revertir las tendencias que, en 2010, provocaron la pérdida de 1.24 millones de vidas y que para 2018 superó los 1.35 millones de defunciones por esta causa (WHO, 2019).

Como se ha constatado a lo largo de este documento, el escenario en México también plantea importantes desafíos. A pesar de las diversas iniciativas, el problema ha escalado de tal manera que el país ocupa el séptimo lugar con mayor número de defunciones por ET en el mundo, siendo el décimo en tamaño de población (Worldmeter, 2020), lo que se refleja en ser una de las primeras causas de mortalidad general y el principal motivo de defunciones en niños mayores de un año, adolescentes y adultos en edad productiva, además de constituirse en la fuente más relevante de fallecimientos por factores externos y el segundo motivo de orfandad (WHO, 2018). Adicionalmente, la probabilidad de continuar aumentando en diversos sectores de la población es cada vez mayor, especialmente entre las personas jóvenes, provocando que la edad promedio de defunción de las víctimas sea de 39 años, lo que implica una enorme pérdida de años de vida y de productividad.

Los resultados de este estudio coinciden con distintos análisis en que los peatones representan la mayor proporción de las defunciones, seguidos de los ciclistas y motociclistas (Híjar et al, 2018; Muro-Báez VA, 2017). Como consecuencia, los lesionados por ET demandan anualmente más de tres millones de consultas y más de dos millones y medio de días-cama en las instalaciones hospitalarias del sector salud; adicionalmente, se estima que en hospitales particulares se tiene una afluencia similar, lo cual genera anualmente 18,000 discapacitados permanentes (OPS-WHO, 2018) y una repercusión económica por más de 63 mil millones de pesos (Ventura-Alfaro et al, 2015).

Ante este aumento de intensidad en las discordancias de tránsito y sus procesos latentes de riesgo, cada vez más grupos de trabajo impulsan diversas iniciativas de ‘seguridad vial’, lo que ha reunido la voluntad suficiente para que el tema de la inseguridad en el transporte forme parte de los ODS. Para México, esta adhesión a la Agenda 2030 de la ONU se tradujo en colocar el tema en el espacio político, por lo que en algunos momentos ha aparecido en distintos discursos adornando las prioridades de algunas autoridades de gobierno. No obstante, como en la mayoría de los problemas que el país enfrenta, existen enormes brechas entre lo que las autoridades se comprometen a hacer y las

posibilidades de lograrlo mediante el conocimiento real y sistemático sobre el fenómeno, comenzando en este caso por la ausencia de sistemas de registro confiables y válidos que permitan realizar estimaciones que respondan a preguntas más allá de ‘cuántos’ y que puedan ser verificables, trazables y comparables, lo que elimina, casi por completo, las posibilidades de diseñar políticas públicas basadas en la mejor evidencia disponible.

Desde luego, al ser un fenómeno multifactorial, existen diversas variables que confluyen para que la evolución del fenómeno continúe con la inercia de crecimiento, lo que en sí mismo constituye una de las explicaciones sobre porqué su paradigma de estudio también se encuentra en crisis desde hace ya varios años, extendiendo el aprieto del estatismo conceptual a la parálisis instrumental. Es así como, desde hace algún tiempo ya, quizá décadas, la situación de las herramientas de estudio resulta similar a la de los números romanos en la edad media³⁶, provocando que las investigaciones sobre ET se encuentren desarticuladas y con profundas lagunas de análisis, propiciando un amplio menú de inconsistencias conceptuales, teóricas, metodológicas e instrumentales, un hecho que frecuentemente bloquea o pospone los acuerdos mínimos sobre qué y cómo medir diversas dimensiones asociadas con el fenómeno de la inseguridad y el riesgo en el transporte.

Por lo anterior, la potencial solución a los problemas relacionados con el paradigma de estudio y su impacto en la falta de capacidades para observar, registrar, medir, analizar y evaluar este fenómeno trasciende a las fronteras mexicanas. No obstante, la enorme inversión de tiempo y recursos para contar con los elementos de estudio más simples, como son recolectar y procesar datos mediante operaciones estándar, o contar y estimar tasas y promedios, afecta en mayor medida a los países que, como México, frecuentemente deben reprocesar datos, estimaciones y resultados para obtener coherencia en los relatos que se desprenden de sus cifras oficiales.

De este modo, la burocracia dedicada a la producción de datos ha formalizado mediante el eufemismo del concepto ‘actualización de datos y estadísticas’, a los procedimientos de mejorar su calidad y consolidar las cifras oficiales en periodos de tiempo extremadamente largos, acciones que dificultan y retrasan aún más el trabajo de los especialistas y la utilidad de sus resultados —motivando la falta de oportunidad y confiabilidad—, lo que se vuelve evidente en el retraso permanente de entre dos y tres años para poder acceder a información ya procesada, y de entre tres y cinco años para que los resultados que cumplen con el rigor científico necesario, puedan ser publicados, lo que rara vez

³⁶ Un sistema numérico ampliamente extendido utilizado de manera unánime tremendamente defectuoso que ni siquiera contemplaba al número cero. La persistencia en mantenerlo vigente provocó que, mentes brillantes dedicadas a producir conocimiento, perdieran la oportunidad de aportar a la humanidad, debido a las restricciones impuestas por las rígidas reglas del sistema numérico y sus múltiples fallas prácticas como herramienta de trabajo y de pensamiento, extendiendo las imposibilidades, el malestar y la agonía por un periodo de tiempo innecesario.

garantiza su reproducibilidad mediante los datos no primarios, retrasando aún más su potencial utilidad y usabilidad con fines prácticos, preventivos o de planificación.

A pesar de los múltiples convenios de colaboración con organismos internacionales orientados a mejorar la cantidad y calidad de los datos sobre ET, la situación en México no ha mejorado en gran medida. Si bien es cierto que los desarrollos tecnológicos recientes han permitido que los organismos oficiales integren volúmenes de datos más grandes, no todas las entidades comparten los protocolos y métodos de recolección de datos, ni poseen los mismos conjuntos informativos, por lo que las únicas bases de datos consistentes se reducen a los *Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas* (ATUS) durante el periodo 1997-2018 y las defunciones registradas en las *Estadísticas Vitales y Defunciones Generales y Fetales*, la cual contiene datos sobre ET en el periodo 1998-2018, siendo el último año liberado apenas hace unos pocos meses (INEGI, abril de 2020), los cuales fueron incorporados en todos los análisis de este estudio para aumentar la vigencia de los resultados.

En este sentido, que la longitud de las series de datos de defunciones en México sea de apenas 20 años indica cuándo comenzaron a cobrar relevancia como un problema de salud pública. En esta misma dirección, el que los diccionarios de datos permanezcan tan estrechos e invariantes en el tiempo no solo muestra su poco peso y relevancia en las políticas públicas, sino que brinda elementos para reconocer el agotamiento de su paradigma de estudio y de sus herramientas de análisis, ya que mantener al sistema con los mismos datos, indicadores e interpretación desde hace décadas señala un marco conceptual y de trabajo muy limitado que inhibe la incorporación o desarrollo de nuevos conceptos, definiciones, protocolos de recolección, registro, almacenamiento y análisis, debido entre otras cosas, a su limitada utilidad para evaluar acciones, programas y políticas relacionadas con los ET y diseñar estudios de impacto debidamente fundamentados, siendo estos los de mayor potencial para explicar fenómenos complejos y establecer relaciones causales (Christoforou, 2013; Danaf, 2015; Dong, 2018).

En suma, otro de los efectos negativos del agotamiento del paradigma actual es la preservación de estos ciclos para conformar bases de datos cortas y angostas, lo que fomenta múltiples externalidades negativas debido a que la situación ya se ha instalado en diversos sectores, ámbitos y espacios de trabajo de manera orgánica, por lo que el retraso en el análisis de las evidencias propicia que los datos oficiales sirvan solo para la narrativa y no para diseñar estrategias ni políticas públicas.

Sin embargo, esta situación puede solucionarse mediante la adopción de los distintos modelos y procedimientos que se presentan en este trabajo; para lograrlo, bastaría evaluar e incorporar la utilidad práctica de los diversos indicadores desarrollados aquí con el fin de programar e instalar los algoritmos

necesarios para que las ecuaciones que realizan las diferentes estimaciones se alimenten directamente de un sistema automatizado de recolección y procesamiento de datos.

Por lo anterior, el núcleo de esta investigación no consiste solamente en incorporar más conceptos y definiciones para ampliar el lenguaje y las estimaciones sobre los registros de ET, sino en acompañar al cambio de paradigma y ofrecer herramientas para impulsar una nueva forma de pensamiento que coadyuve a encontrar soluciones a los problemas clásicos y, sobre todo, a confeccionar nuevos planteamientos ante la apremiante realidad, ya que es necesario reconocer que el sistema actual de recolección, gestión y análisis de datos sobre ET se utiliza apenas para un poco más que contar eventos, heridos y muertos.

Ahora bien, como es habitual en la mayoría de las disciplinas que requieren de análisis cuantitativo y métodos de investigación experimental, el sistema de ecuaciones aquí presentado no es un catálogo de recetas para obtener un número real, sino una estructura matemática consistente —desarrollada a partir de conceptos y notación propia— que incorpora modelos y ecuaciones a partir de otros modelos para aproximarse a diversos aspectos del fenómeno de transporte con el fin de articular relaciones y acotar los significados y alcances de las definiciones, así como impulsar la comprensión de situaciones no evidentes entre las variables, fomentando la claridad argumentativa y la generalización de resultados, todo bajo un marco teórico que fomenta la consistencia, comparabilidad y replicabilidad como atributos deseables e imprescindibles para la producción de conocimiento científico (Bunge, M., 1981; Kuhn, T., 1989; Popper, K. R., 2003).

Como el desafío de realizar un diagnóstico y monitorear los ET no solo reside en establecer un conjunto de indicadores sino, sobre todo, en la capacidad de poder realizar las estimaciones planteadas con los datos disponibles, además de ofrecer un abanico de herramientas para su agregación y representación tabular, gráfica y cartográfica, a lo largo del estudio se describen los métodos de estimación, aproximación y proyección, lo que complementa las posibilidades de uso, integración y modelación mediante otras técnicas analíticas, inferenciales y computacionales, coadyuvando así a garantizar que estas puedan ser útiles, trazables y reproducibles a lo largo del tiempo y brindando estabilidad a las estimaciones conforme se desarrollan más conceptos y mecanismos para ampliar la capacidad y calidad del conjunto informativo, algo que es necesario mantener en las distintas escalas político-administrativas de la República para lograr atender las necesidades de conocimiento y ayudar a contrarrestar y abatir esta otra pandemia.

Por ello, para hacer esta propuesta operativamente viable, sería muy útil diseñar procedimientos de validación ágil de datos con el fin de incorporar las estimaciones a un conjunto más amplio de datos e información que alimente la familia de indicadores seleccionados, los cuales podrían actualizarse de

manera inmediata conforme se vayan registrando los nuevos flujos de datos, permitiendo una periodicidad inferior a la anual e incentivando su análisis y validación mediante procedimientos automatizados de control de calidad y supervisión experta centralizada. Un procedimiento como el descrito ahorraría una gran cantidad de esfuerzos individuales y, potencialmente, podría proveer de datos, información e incluso conocimiento de gran valor (Aven, T., 2013), a una gran cantidad de personas y grupos de interés de manera ágil, oportuna y transparente, acortando significativamente los tiempos entre entregas y facilitando y fomentando el análisis periódico de los avances y resultados de distintas iniciativas.

Con el fin de contrarrestar las diversas dificultades mencionadas y lograr su implementación exitosa, los cuatro capítulos de esta investigación se han orientado a establecer una valoración más objetiva y transparente sobre las mediciones de diversos aspectos de los ET a partir de los datos e información oficial, garantizando la comparabilidad de toda la información utilizada mediante técnicas estándar de integridad y trazabilidad en diferentes escalas territoriales y temporales, lo que podría ayudar a colocar los cimientos para conocer el estado actual de la situación y plantear con seriedad, objetivos que resulten medibles y apunten a una revisión sistemática de los avances y retrocesos en materia de transporte, condición necesaria —más no suficiente—, para valorar los aciertos y desaciertos de las acciones y estrategias emprendidas por las autoridades y los grupos de interés que son responsables de combatir los crecientes niveles de riesgo asociados con el tránsito, posibilitando así el ejercicio real del derecho de la ciudadanía a contar con una rendición de cuentas efectiva y útil.

Para comenzar, la presentación de la escena global en el Capítulo 1 muestra el estado de la situación mediante cifras que sintetizan las asimetrías en la distribución de los eventos, defunciones e impactos, poniendo de relieve que sus efectos están condicionados por el estatus socioeconómico de las personas y las sociedades, complementando el estado del arte con los contrastes sobre el avance de los países, así como el reconocimiento y regulación de diversos elementos imprescindibles para atender la inseguridad vial, lo que permite confirmar que, además de ser un grave problema de salud, también es una expresión de la desigualdad estructural en todas las escalas sociales a nivel global.

En este apartado también se analizaron cuestiones epistemológicas asociadas con la crisis de los paradigmas que han dominado en el estudio del tránsito y se concluye que: 1) el paradigma alternativo es inviable porque es completamente reactivo y propone que ‘el punto de equilibrio de un sistema de transporte es aquel en el que no existen ET; 2) que el paradigma reflexivo —de corte más creativo y que reconoce que la sociedad coexiste y administra riesgos—, se ha agotado también porque, aunque ha renunciado explícitamente a las ideas de control, certidumbre y seguridad (Beck, 2006)—, continúa promoviendo la idea de que los ‘accidentes de tránsito’ son algo inevitable; 3) que es deseable fomentar el paradigma de la complejidad porque promueve actitudes más proactivas y admite

abiertamente que existen dinámicas sociales productoras de riesgos y que estas pueden ser disminuidas mediante la intervención planificada y la modificación de la conducta, lo que puede lograrse a partir del conocimiento científico y el análisis de evidencias (Sánchez-Restrepo, H., 2019).

Asimismo, el aporte de la última sección de este capítulo permite conocer y discutir sobre los elementos, herramientas e infraestructura de datos que son necesarios para dimensionar y analizar el territorio mexicano como el espacio geográfico en estudio, por lo cual se muestran sus asimetrías en la composición poblacional, el potencial en su multiplicidad de dinámicas demográficas y la heterogeneidad de su infraestructura vial, dimensiones que adelantan la complejidad asociada con el análisis de la República Mexicana como un todo y no solo como la simple agregación de sus tantas entidades administrativas, su amplio territorio o sus distintas áreas geográficas.

En correspondencia con sus primeros planteamientos, a través de este trabajo se aporta a la construcción de un nuevo paradigma que pueda sostenerse sobre el conocimiento científico y las evidencias, con este fin, a lo largo de los capítulos 2, 3 y 4, se desarrolla un conjunto de modelos articulados provenientes de distintos marcos teóricos, procurando su convergencia hacia el estudio del riesgo asociado con el transporte y los niveles de exposición y vulnerabilidad de las personas que son sujetos activos de la movilidad, componentes esenciales de los procesos de frecuencia —ocurrencia de ET— y de la severidad —magnitud de sus consecuencias—.

Como el caso de estudio está acotado por las ocurrencias en la República Mexicana, se utilizó el desarrollo del modelo para exponer el estado actual del país respecto a los ET, lo cual se expone como un relato articulado de resultados que avanza de manera sistemática, progresiva y secuencial, permitiendo la posibilidad de argumentar cada situación y exponer, mediante la implementación de los desarrollos teóricos, su aplicación práctica mediante la utilización de los datos más extensos, detallados y actualizados con que cuenta México oficialmente al día de hoy: series mensuales entre 1997 y 2018 que permiten describir el pasado, evaluar el estado actual y proyectar los valores futuros de los ET con cierto grado de confianza estadística en las diversas escalas administrativas del país —nacional, estatal, municipal o de carretera—.

Para establecer los pilares del modelo general basado en las discordancias de tránsito y los procesos de riesgo, el Capítulo 2 aporta un conjunto sintético de ecuaciones basadas en la teoría de probabilidades, los procesos estocásticos compuestos y el análisis de series de tiempo, lo que genera una familia de indicadores homologados. Su uso para realizar las diversas estimaciones instalan un aparato conceptual y de medición que permite abordar el primer gran desafío: estimar apropiadamente —en forma longitudinal y transversal— los diversos indicadores de frecuencia, incidencia, letalidad, mortalidad, morbilidad y riesgo en distintas escalas territoriales y periodos de tiempo, lo que se detalla

ampliamente, pero no en forma exhaustiva, a través de las 68 ecuaciones definidas mediante una notación que permite incorporar distintos desarrollos relacionados con la inferencia estadística y las proyecciones de los valores futuros de las variables asociadas con el riesgo de ET.

De este modo, los diversos análisis de los procesos de ocurrencia, frecuencia y severidad de los eventos posibilitaron la estimación y proyección futura de diversos indicadores, tasas, intensidades y fuerzas de incidencia, letalidad, mortalidad, morbilidad y riesgo, entre otras; resultados que fueron representados mediante 59 gráficos de naturaleza estadística y una amplia diversidad de técnicas de visualización sintética, así como la inclusión de 16 diseños cartográficos, lo que implicó ejercicios de inferencia e interpolación de cifras que no son provistas directamente por los sistemas de registros.

Otro elemento relevante en esta sección consiste en definir el proceso de mortalidad como una función aleatoria, ampliando la oportunidad de extender los instrumentos de modelación y la eficiencia en las estimaciones y pronósticos, lo que a su vez permitió captar propiedades estadísticas que estiman su probable evolución e impacto en distintos aspectos, incluyendo los demográficos, de salud y financieros. Así, el marco teórico provisto por los modelos presentados en este capítulo permite estandarizar los procedimientos para realizar las proyecciones sobre la probable evolución de las distintas cifras e indicadores con bandas de confianza basadas en los errores de estimación y la varianza propia de los datos, así como interpolar y expandir los resultados hacia grupos de población o conjuntos espaciales o temporales sobre los que no se tienen datos o se poseen dudas razonables sobre su calidad, sugiriendo acuerdos técnicos y metodológicos que permitirían estimar los posibles impactos de ciertas acciones en el ámbito público y, sobre todo, amplificar la posibilidad de establecer parámetros y estándares de estimación para consolidar las cifras oficiales.

Sin duda, otro gran aporte de este capítulo consiste en sugerir los pasos para evitar discursos etéreos basados en números alegres que podrían ayudar a diluir la magnitud del problema y evitar que las autoridades eludan sus responsabilidades, sobre todo en lo que refiere a la aceptación y promoción de una varianza innecesaria en los resultados de las investigaciones motivada por la falta de lineamientos técnicos claros y rigurosos.

Desde luego, en este apartado, el marco teórico que sirve de paraguas conceptual al conjunto de ecuaciones continúa siendo el aporte esencial, pues reconocer que existen variables latentes —las discordancias de tránsito—, permite el uso de otros constructos tales como letalidad, vulnerabilidad o intensidad de los riesgos, para definir una gran cantidad de variables que no son directamente observables, así como medirlas adecuadamente mediante procedimientos estadísticos apropiados. En este sentido, es necesario advertir, una vez más, sobre la necesidad de cumplir con los supuestos que se han planteado en cada caso para que los resultados del uso de los modelos satisfagan los estándares

de calidad y se eviten sesgos sistemáticos durante el proceso de estimación; para lo que también es necesario realizar una secuencia de pasos imprescindibles que satisfagan las condiciones mínimas de calidad en los procesos de registro y gestión de los datos primarios.

Una vez establecidas las bases conceptuales, los principios de modelación y una gran cantidad de definiciones, en el Capítulo 3 se amplía el conjunto de métricas con índices espaciales y temporales que permiten la integración de covariables en la notación. Las 88 ecuaciones desarrolladas permiten implementar distintos algoritmos para producir las estimaciones y realizar inferencias de naturaleza estadística. A partir de los resultados, se produjeron 48 gráficos estadísticos y se editaron 9 cartogramas con datos inéditos, lo que ofrece una gran cantidad de información condensada que ofrece conocimiento sobre diversos aspectos del riesgo por ET y su efecto en la dinámica poblacional, comenzando por la privación de la vida, la intensidad del riesgo y sus variaciones y la distribución de los tiempos de latencia, así como la magnitud y evolución del tiempo de vida perdido por cada defunción y su equivalencia social en términos poblacionales.

Además, es en este apartado en donde se consolidan los estándares de completitud, consistencia e integridad de las estimaciones que deseablemente conforman el núcleo del conjunto informativo. Como puede confirmarse en cada caso, todas las ecuaciones desarrolladas poseen un componente espacial y un índice temporal con el fin de garantizar la transparencia, veracidad y replicabilidad de los resultados, así como la puesta en marcha de análisis secundarios, experimentos y estudios de impacto, reconociendo el rol del territorio en el estudio del fenómeno y la posibilidad de extender el conocimiento y abrir nuevas vetas de investigación desde el ámbito geográfico.

Sin embargo, es en el Capítulo 4 en donde se da la mayor expansión y dinamismo del modelo, ya que incorpora la analogía ecológica de los *riesgos competidores*, la cual permite integrar diversos métodos de análisis, utilizar mecanismos de agregación y desagregación, así como establecer categorías e identidades que permiten realizar diversos análisis por nivel de vulnerabilidad, tipos de ET o cohorte, ampliando el abanico de preguntas que pueden considerarse mediante estos nuevos planteamientos y sobre las ocurrencias de diferentes clases de riesgos. Para complementar las posibilidades de estimación, la sección que desarrolla los métodos de interpolación aporta también en los ámbitos conceptual e instrumental, ya que explica cómo realizar las estimaciones para periodos de tiempo menores a la periodicidad típica anual de los datos —a partir de las distintas formulaciones teóricas—, lo que resulta sumamente pedagógico.

Adicionalmente, con este mismo énfasis, se analiza la relación biyectiva entre las estimaciones de las probabilidades con un solo riesgo y las estimaciones para múltiples tipos de riesgo, señalando los caminos para ir de un lado a otro optimizando los cálculos, lo que disminuye las iteraciones y hace más eficiente el procesamiento y los algoritmos, lo que se logra mediante las 63 ecuaciones

desarrolladas, los 55 gráficos con contenido estadístico y los 6 modelos cartográficos, los cuales parten del análisis de los determinantes del riesgo y dan cuenta de sus consecuencias, originando diversos planteamientos para reconocer el tipo de efecto implicado en las variaciones registradas en México durante los últimos 20 años.

En la última sección de este capítulo se analiza la situación de México ante los desafíos planteados por los ODS. Los diversos planteamientos confirmaron que, en México, los problemas derivados de los ET superan a muchos otros países desde hace décadas y que, además, se han multiplicado en tal magnitud que la siniestralidad en las vías constituye una de las pandemias más relevantes en el presente, produciendo anualmente más de 16,000 defunciones —dos personas cada hora—, representando un promedio de 2.7% de todas las defunciones registradas en el país y superando en algunos grupos etarios al 10% del total, con el agravante de que 38% de estas muertes ocurren entre usuarios fuertemente vulnerables. Así, después de analizar el amplio conjunto de evidencias disponibles, es posible arribar a dos conclusiones principales:

1. Se requiere desarrollar mejores modelos de estimación para establecer, a priori, objetivos claros que se puedan monitorear en forma transparente y objetiva, esto se debe principalmente a que las condiciones y mediciones históricas y actuales permiten una amplia variedad de estimaciones, comparaciones e interpretaciones que, sin lugar a duda, producirán distintos relatos cuando sea necesario y útil, y
2. Que no importa cuál método, parámetro o regla de estimación o proyección se elija, a pesar de que hay diversas evidencias de que México ha avanzado en algunos sectores, grupos de población y tipos de usuario, el objetivo ‘De aquí a 2020, reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo’ (WHO, 2017), se encuentra aún demasiado lejos de poderse cumplir, ya que —en el caso más optimista y menos realista (Cervantes, 2018)—, para el año 2020 se ‘estarían evitando’ alrededor entre 30 y 50 mil defunciones por ET, lo que equivale a dos o tres años años de defunciones por esta causa, aún demasiado lejos del 50% propuesto.

Ahora bien, como se ha señalado en diversas ocasiones, algunos individuos son más vulnerables que otros y, por lo tanto, son susceptibles de mayor daño ante variaciones en su exposición manteniendo el mismo tipo de dinámica y vehículo (Cunha; Garrafa, 2016). Por ello, las situaciones y condiciones en que se dan los ET —y su estudio mediante la agrupación por tipo de vehículo—, profundizan el impacto diario de las condiciones sociales de vida, tales como: trabajo, sexo, estatus socioeconómico y escolaridad, entre otros (Almeida, 2010), ya que, en situaciones desfavorables, estas circunstancias aumentan la vulnerabilidad a la integridad del ser humano, haciéndolo susceptible de un mayor riesgo (Kottow, 2003, 2004, 2011).

De este modo, la caracterización de los distintos grupos de población mediante una tipología y niveles de vulnerabilidad —basadas en las estimaciones paramétricas de sus riesgos específicos— podría aportar evidencias a la discusión pública y la toma de decisiones sobre diversas acciones, estrategias y directrices sobre la movilidad, así como facilitar la simulación de los efectos potenciales de ciertas regulaciones e intervenciones con base en la mejor evidencia disponible. A pesar de que la reformulación conceptual del riesgo por ET como una variable latente ha logrado generar los puentes metodológicos necesarios para realizar el análisis de las discordancias de tránsito y los riesgos en competencia en forma rigurosa, existe una multiplicidad de consideraciones para aumentar la calidad y cantidad de información sobre los ET ya que, por definición, todo modelo es incompleto.

Por ejemplo, el andamiaje instrumental desarrollado en esta investigación ofrece diversas y amplias oportunidades de extensión que sugieren nuevas prácticas para recolectar más y mejores datos, lo que debe hacerse incorporando las nuevas tecnologías de procesamiento y geolocalización en el momento de producirse un ET, lo que permitiría anotar diversos datos sobre las condiciones previas a la ocurrencia, coadyuvando a la comprensión de sus causas y los factores que se encuentran asociados con las características y la severidad el evento, sobre todo entre los usuarios fuertemente vulnerables: peatones, ciclistas y motociclistas, en donde la revisión de la literatura revela profundas lagunas de conocimiento que podrían investigarse para México, como son las siguientes:

1. La relación funcional entre el número de ET que involucran a usuarios vulnerables de la vía pública y sus niveles de exposición, lo que ya se ha explorado con avances relativos (Brüde y Larsson; 1993; Jonsson, 2005; Elvik, 2009a) y en los que se han encontrado relaciones divergentes, lo que se ha interpretado como el efecto observable del fenómeno denominado *seguridad en números* (Smeed, R., 1949; Elvik, R., & Goel, R., 2019), hipótesis que podría ser evaluada para México mediante la estimación de la función de desempeño de la seguridad en intersecciones, permitiendo estimar los parámetros respectivos para peatones y ciclistas atropellados por vehículos motorizados, un tipo de análisis que en diversos estudios (Jonsson, 2005; 2013, Schepers et al., 2011) ha sido cuestionado por falta de validez y confiabilidad, pero que, metodológicamente, se resuelve con las herramientas entregadas por este modelo.
2. La relación entre velocidad, frecuencia y letalidad (Anderson et al., 1997, Pasanen, 1992, Teichgräber, 1983), sobre todo como detonadores de ET y la relevancia de la velocidad del impacto para el riesgo de defunción (Davis, 2001, Richards, 2010, Rosén et al., 2011, Rosén y Sander, 2009), una pregunta directa y simple sobre el que aún no existen evidencias contundentes debido a las limitaciones en el tratamiento experimental, ya que en todos los estudios revisados se han encontrado fallas de tratamiento y control estadístico apropiado: en

dos de ellos se utilizan datos sesgados (Anderson et al., 1997, Pasanen, 1992), el tercero utilizó una composición de edad atípica y no está vigente (Teichgräber, 1983). Además, resultados más recientes muestran que el riesgo de fallecer es mucho menor de lo que se creía antiguamente (Richards, 2010, Rosén y Sander, 2009, Tefft, 2011), por lo que es necesario realizar un mejor ajuste a las curvas de riesgo de fatalidad con el fin de emitir políticas de velocidad con base en información válida y confiable.

3. La relación entre la velocidad media de viaje y la severidad del resultado de las lesiones para peatones y ciclistas atropellados por vehículos motorizados, lo que, en esencia, es una cuantificación física modulada por las características individuales pero que nadie ha probado ya que la severidad de la consecuencia y la gravedad de la lesión podría relacionarse más con entorno de velocidad que con la del evento mismo.
4. La relación entre la edad y la severidad de la consecuencia de un ET en los peatones atropellados (Henary et al., 2006) y ciclistas (Eluru et al., 2008), sin contar que incorporar la edad de la víctima en los análisis estándar sería bastante útil por al menos dos razones: 1) comprender cómo afecta la edad a la severidad del resultado y 2) controlar estadísticamente por edad para conocer el efecto de otras variables latentes.
5. Estimar el riesgo condicional de peatones y ciclistas a sus niveles de exposición ya que, a pesar de que tienen mucho en común cuando se trata de ET, la magnitud de los desplazamientos no se encuentra en los mismos órdenes de magnitud ni se dan sobre la misma infraestructura (Maki et al., 2003, Watson, 2010), por lo que su fragilidad en el entorno del tránsito puede mostrar diferencias y similitudes que permitan diseñar políticas expofeso para cada grupo.

Como puede verse, estos cinco planteamientos tienen en común tres elementos:

1. Son preguntas relativamente simples que cualquier persona respondería con facilidad —sin ser su respuesta necesariamente cierta— a partir de su intuición, experiencia y ‘el sentido común’.
2. Existen resultados de diversas investigaciones que responden de manera diferente a estas cuestiones mediante distintos métodos y estimaciones que han sido duramente cuestionados.
3. La respuesta al planteamiento tiene alto impacto en la definición de acciones de política pública que trastocan la vida de la sociedad en su conjunto.

Ante el enorme impacto de los ET y el complejo problema de salud que representan para México, es claro que el azar solo juega un rol en el plano individual de las personas involucradas, ya que las evidencias que arrojan los datos señalan una conjugación de factores que provocan una distribución heterogénea, afectando en mayor medida a ciertos grupos etarios y provocando que los diferentes tipos de ET evolucionen de distinta forma en el tiempo y a través de las cohortes, lo que conjuga elementos de azar con determinismo social y sugiere ampliar el número de variables a ser estudiadas e implementar acciones de seguimiento a los involucrados en un ET con el fin de investigar, en forma más profunda y precisa, la dinámica y situación antes, durante y después de la ocurrencia del evento.

Por lo anterior, para completar y redondear una investigación sobre el estado de la situación en México, hace falta analizar los factores asociados a los ET, en especial a lo que atañe a la valoración subjetiva del riesgo y la caracterización de los perfiles de los distintos usuarios de la vía, así como su relación con los niveles de exposición y vulnerabilidad, lo que podría complementarse con los niveles de experiencia y habilidad al volante y su grado de afinidad o aversión a las conductas de riesgo durante la conducción, ya que, como se ha verificado: las colisiones predominan entre los conductores jóvenes, las defunciones de los motociclistas son cada vez mayores y las mujeres representan apenas 20% de los involucrados, no obstante, para todos estos hechos y muchos otros, es necesario conocer las probabilidades de variación del fenómeno en el corto, mediano y largo plazo, intentando siempre explicar los porqués.

De este modo, para encontrar explicaciones a este tipo de planteamientos, es necesario segmentar grupos de población por atributos y realizar controles estadísticos durante los procedimientos variacionales, para lo cual el modelo provee de las ecuaciones necesarias para llevarlo a cabo. Sin embargo, los datos oficiales en México aún no alcanzan este nivel de madurez, convirtiéndose en un nudo gordiano que es necesario desatar, lo que exige de un trabajo arduo y sistemático en el que las variables susceptibles de registrarse adecuadamente —como el nivel de escolaridad o la profesión u oficio de los involucrados— todavía presentan enormes desafíos de trazabilidad y comparabilidad debido a procedimientos erróneos de codificación, falta de consistencia y elevados porcentajes de datos nulos, produciendo vacíos en los conjuntos informativos que demandan esfuerzos titánicos para lograr reconstruir aspectos de la realidad que podrían registrarse íntegramente con facilidad.

Es por ello que, al reformular las herramientas y desarrollar nuevas gafas metodológicas, también se pretende modificar las simientes de los proyectos de investigación geográfica orientados a los sistemas de tránsito, aumentando con ello el nivel de profundidad y madurez de la conversación, un proceso necesario para que los distintos análisis continúen aportando datos, información, conocimiento y sabiduría a la ecología de los saberes interdisciplinarios sobre los ET, con el fin de impulsar una movilidad con menores niveles de riesgo y mejores relaciones sociales que contribuyan a disminuir la

pérdida de vidas humanas y el desgaste físico, económico, social y emocional, que padece la humanidad por este fenómeno social.

Al analizar los resultados de esta investigación, es evidente que aún falta mucho por hacer y que existen múltiples motivos por el que las acciones podrían tener un alto costo de oportunidad en México. En primer lugar, la ausencia de un programa intersectorial que permita coordinar los esfuerzos para medir el impacto de las distintas iniciativas y realizar diagnósticos integrales, sigue siendo un tema pendiente (Híjar, 2004). En este sentido, como menciona Luis Chías (2009): ‘si se parte de premisas equivocadas o poco sustentadas, se generan falsas creencias y patrones de conducta inadecuados, [los cuales] incrementan de manera implícita, los riesgos sociales y naturales que se conjugan en la ocurrencia [de los ET]’.

Para atender estas áreas de mejora, es necesario coordinar distintas funciones del Estado, fundamentalmente: las responsables del urbanismo, educación, salud pública, transporte y vialidad, así como la policía, el aparato de comunicación social y las empresas aseguradoras, además de las compañías e iniciativas que promuevan u ofrezcan servicios que hagan uso intensivo del tránsito. La reunión de esta diversidad de sectores pueden generar sinergia mediante el desarrollo de estrategias para crear beneficios compartidos, la articulación de iniciativas y la toma de decisiones basadas en las mejores evidencias disponibles limitará la dominación y puesta en marcha de las ocurrencias políticas y las ficciones del ajuste estético de las cifras, fomentando la planificación estratégica y secuencial de acciones a corto plazo orientadas a transformar una evolución indeseable en el largo plazo.

De este modo, si se acepta que cada intervención en los espacios públicos mediante la regulación de la movilidad tiene una meta esencial que consiste en mejorar la convivencia y disminuir la inseguridad en la vía pública, con todos los beneficios sociales, económicos, psicológicos y de salud que eso conlleva, es posible entender la importancia de desarrollar un mejor marco de trabajo, uno con mayor potencia y pilares más sólidos que permitan ir más lejos y sostener análisis más robustos mediante procedimientos que no pongan en duda los resultados debido a la falta de solvencia teórica o metodológica, permitiendo además, una adecuada legislación y su correcta aplicación; lo que plantea un escenario con múltiples externalidades positivas en el ámbito del transporte y fuera de él, proceso en el que la Geografía se debe situar en el centro debido a su nuevo auge como ciencia transversal e integradora de saberes interdisciplinarios.

Por último, para cerrar las brechas entre los indicadores de México y las metas globales que ha suscrito, es vital que sus autoridades atiendan la que es, por mucho, la recomendación sustantiva de la WHO: incorporar el conocimiento que se genera en los centros universitarios y de investigación al diseño de las políticas públicas, ya que la atención de los riesgos de tránsito en sus diferentes escalas, requiere

de un sistema nacional de información que permita registrar el evento, desde su ocurrencia hasta el fin de sus consecuencias, además de articularlo con los servicios médicos y forenses estatales, los servicios de salud y un conjunto estable de factores asociados con el evento y los involucrados; ya que, solo así, se podrá crear una verdadera política de Estado que permita atender a los fenómenos del transporte mediante un enfoque integral que sustente las estrategias con recursos financieros, conocimiento y acciones basadas en la mejor evidencia disponible.

En el centro de esta propuesta existen múltiples elementos a favor de mejorar los marcos que subyacen al estudio de los ET. Para potenciar el marco teórico, conceptual e instrumental de la investigación sobre los ET, se propuso modelar la incidencia, letalidad, morbilidad y mortalidad mediante la teoría de los procesos estocásticos con el fin de robustecer las estimaciones para obtener indicadores eficientes e insesgados, lo que otorga múltiples ventajas al permitir que los datos generados sean susceptibles de estudio y proyección mediante técnicas consolidadas por el cálculo actuarial y la econometría para el análisis espacial, temporal y de poblaciones.

Adicionalmente, la incorporación de los fundamentos conceptuales de la teoría del riesgo posibilita el estudio de los registros de ET relacionados con la ocurrencia, frecuencia y severidad como componentes del riesgo, una herramienta sumamente intuitiva para conocer las propiedades estadísticas de las distribuciones empíricas de las variables, así como para generar las ecuaciones que modelan los procesos compuestos de riesgo, permitiendo estimar la evolución de los indicadores de incidencia, morbilidad, mortalidad y letalidad, a lo largo del tiempo y en diferentes espacios geográficos, al mismo tiempo que permite discernir y estimar el impacto de los ET en las dinámicas poblacionales de distintos grupos etarios.

i. Transparencia para la rendición de cuentas

Un problema de alto nivel de complejidad consiste en integrar distintos marcos analíticos para analizar conjuntos de observaciones sobre grupos de individuos o poblaciones que participan sucesivamente en transiciones —dadas por un orden temporal que atañe a distintos periodos de gobierno—, en forma clara y transparente. Como los desafíos para gestionar las amenazas a la sociedad mediante el aumento de la mortalidad y la producción de discapacidades permanentes afectan sensiblemente no solo a las personas y sus familias, sino también a los sistemas económicos y de salud, la previsión y control de los escenarios es parte sustantiva de las funciones de las autoridades y los responsables de diseñar e implementar las políticas públicas, lo que solo se puede realizar mediante procedimientos estandarizados de medición, estimación, evaluación y monitoreo a lo largo del tiempo.

Para estudiar la latencia de los ET y la vulnerabilidad de cada grupo poblacional, se plantea el uso de una analogía ecológica basada en el concepto de ‘competición’ en el cual las variables latentes que producen ET —denominadas discordancias viales— contienden entre ellas para realizarse en cada oportunidad de ocurrencia y en donde una, y solo una de las múltiples secuencias *discordancia-ET-individuo-tipo-clase*, lo que se constituye en el resultado o materialización del riesgo. De este modo, los diversos modelos propuestos a lo largo del texto incluyen, además de las estimaciones, los procedimientos para realizarlas en distintos horizontes temporales y delimitaciones territoriales, lo que añade la posibilidad de actualizar los análisis y la interpretación de sus resultados conforme se integren

nuevos datos al conjunto informativo nacional, un instrumento de rendición de cuentas sumamente potente.

Por su parte, el uso de los modelos de series de tiempo para realizar las proyecciones de los fenómenos registrados permite replicar las estimaciones y analizar los aciertos y las fallas potenciales de ciertas acciones y estrategias, con el fin de disminuir y corregir los errores. En este sentido, la posibilidad de adaptar el registro y estimación de distintas aristas del fenómeno permite ampliar y consolidar los procesos de levantamiento que llevan a cabo las instituciones oficiales, lo que podría mejorar su alcance mediante la generación de componentes informativos debidamente relacionados y la expansión de los análisis para crear un ‘ecosistema de la seguridad vial en México’, incentivando así profundización en la comprensión del fenómeno, con el objetivo de enfocar los esfuerzos en salvar vidas mediante el conocimiento y abordaje científico de los procesos de riesgo, y no solo en abatir las cifras o mejorar su comunicabilidad.

ii. Colaboración intersectorial

Dado que los riesgos no son homogéneos en el territorio ni en el tiempo, las variaciones en su intensidad dependen sensiblemente de la definición y acotamiento en cada delimitación geográfica y temporal, evidenciando un conjunto de situaciones que producen ET con dinámicas propias, lo que se puede reconocer fácilmente entre las urbes de diversos tamaños y su relación con las distintas opciones de movilidad.

De este modo, aunque un ET puede ser clasificado en diferentes categorías tales como atropellamiento, colisiones, volcaduras, caídas de pasajero, derrapamiento, y muchos otros, la incidencia de más de un tipo de amenazas y los distintos grados de exposición y vulnerabilidad —que a su vez dependen de diversos aspectos socioeconómicos asociados con el sexo, el grupo etario o el medio de desplazamiento—, son susceptibles de modelación en este marco estocástico mediante funciones conjuntas de supervivencia y mortalidad, haciendo más ágil y fácil la adaptación de los distintos análisis y el uso de resultados mediante la organización funcional de los distintos órdenes y estilos de gobierno.

Con el fin de desarrollar las ecuaciones para modelar los riesgos competitivos y la ocurrencia dinámica de los distintos tipos y clases de ET en una población, se propuso que la coexistencia de los procesos de riesgo sea descrita a través de una familia de variables aleatorias que permita estimar las probabilidades de las transiciones poblacionales con base en registros oficiales. Es así como la última parte de la investigación resuelve el desafío de la modelación de una familia de riesgos mediante la estimación conjunta de una función multivariada mediante métodos provistos por el cálculo actuarial,

el cual se basa en ecuaciones diferenciales que están orientadas a obtener estimaciones dinámicas y probabilidades condicionales, permitiendo la estimación de las probabilidades, tasas y fuerzas de múltiples riesgos, así como a la construcción de las matrices de transición asociadas con las tablas decrementos múltiples, lo que puede ser complementado por fuentes de datos locales como registros policiales, de los ministerios públicos u organizaciones especializadas en temas de movilidad, tránsito, fuentes de discapacidad o muertes violentas.

De esta manera, el análisis de la distribución de los diferentes riesgos que compiten por realizarse en cada uno de los individuos de la población expuesta, dadas sus características colectivas e individuales, permite reconocer las leyes de distribución proyectadas sobre el espacio y tiempo en el que los involucrados ofrecen distintos estados de exposición y vulnerabilidad, permitiendo la integración de parámetros de orden con métricas asociadas a fenómenos tradicionalmente considerados exógenos. Además, este procedimiento se puede realizar en diversas escalas territoriales para facilitar la creación de un sistema geoestadístico integral, el cual debería incluir las probabilidades de realización de distintos escenarios con base en proyecciones condicionadas; ambas herramientas esenciales para simular y evaluar el impacto de las intervenciones e implementar políticas públicas a partir de evidencias.

Así, mediante la ampliación del enfoque y las herramientas con el que se propone modelar a los ET, se coadyuva a establecer mejores mecanismos de estimación para los indicadores actuales y también se aporta al desarrollo de nuevas herramientas conceptuales e instrumentales para estimar y monitorear el avance en la consecución de los ODS. Adicionalmente, es probable que el desarrollo y uso de un marco teórico que considere los múltiples riesgos derivados de un ET como objeto de estudio, pueda fomentar la integración y medición de un conjunto más amplio y diverso de variables e indicadores, permitiendo la inclusión de datos para producir información más específica y geolocalizada, principalmente, en el ámbito social, de salud, económico y de seguridad, brindando la oportunidad de atender este problema en forma intersectorial, uno de los mayores desafíos actuales para los gobiernos nacionales y locales.

iii. Desarrollo de estrategias por tipos de efecto

Debido a su impacto en la población, las defunciones se encuentran en el seno de los estudios sobre ET, por ello ‘su estabilización y posterior disminución’ son los objetivos del DASV, eje de trabajo de los ODS-3 (ONU, 2016). No obstante, la cantidad y distribución de las defunciones por ET en la población tiene múltiples fuentes de variabilidad, por lo que analizar solo sus cambios absolutos o relativos puede inducir errores conceptuales severos, ya que las tasas de mortalidad también varían porque cambia la edad de la población y su nivel de vulnerabilidad; o porque una cohorte haya estado

expuesta a riesgos distintos; o porque durante algún período su exposición se dio en contextos con factores que modificaron sus probabilidades de fallecer.

De este modo, las nuevas herramientas permiten postular hipótesis condicionales de naturaleza causal sobre cambios en la composición de la población, para lo cual se propone descomponer los efectos de la *edad*, el *periodo* y la *cohorte*, algo imposible con los métodos tradicionales y que resulta de vital importancia, ya que:

- El *efecto de la edad* permite tomar en cuenta las variaciones en las tasas de mortalidad debido a la edad cronológica.
- El *efecto periodo* analiza las variaciones inducidas por factores que se han dado en momentos concretos del tiempo, tales como el aumento de las muertes violentas en distintas zonas del país que puede afectar el número de defunciones ‘abordo de un vehículo’ de un ET sin ser lo mismo, lo que afecta a todos los grupos de edad y a todas las cohortes o generaciones, pero en forma diferencial y notoria en muchos casos.
- El *efecto cohorte* afecta a las tasas de mortalidad en función del año de nacimiento de los involucrados, independientemente de la edad en sucesivos periodos de tiempo, lo que resulta relevante en determinados contextos relacionados con la exposición a factores de riesgo, a estilos de vida o a condiciones socioeconómicas.

Así, la posibilidad de estudiar estos tres efectos en la dinámica, frecuencia y severidad de los ET, constituye un hito técnico y conceptual para el correcto análisis de las políticas públicas y su impacto en la planificación de los recursos y la asignación presupuestaria para atender este fenómeno, ya que la oportuna identificación del tipo de efecto en las variaciones en las tasas de mortalidad permitirá valorar los factores que pudieron haber influido en los registros, además de ser el único modo de establecer relaciones causales y motivar explicaciones científicas que permitan gestionar los sistemas de salud y previsión social, así como realizar las estimaciones prospectivas en forma adecuada para garantizar los pasivos contingentes necesarios para su atención como exigen las distintas leyes del seguro social, algo muy poco explorado en el ámbito profesional.

Ampliar el enfoque y las técnicas con las que se modelan los ET ayudará a establecer mejores mecanismos de estimación para los indicadores actuales y aportará nuevas herramientas conceptuales e instrumentales para estimar y monitorear el avance en la consecución de los ODS. Además, el desarrollo y uso de un marco teórico que considere los múltiples riesgos derivados de un ET como objeto de estudio, fomentará la integración y medición de un conjunto mayor de variables, lo que a su vez permitirá incluir datos y producir información más amplia e integral, principalmente, en el ámbito

social, de salud, económico y de seguridad, brindando la oportunidad de atender este problema en forma intersectorial, uno de los mayores desafíos actuales para los gobiernos.

Por su parte, la modelación de los ET mediante procesos estocásticos y el uso de la econometría para la estimación de indicadores en diversas escalas territoriales y temporales provee de procedimientos científicos que benefician a todos los usuarios e interesados en los sistemas de información relacionados con los ET, permitiendo un mayor alcance y una interpretación más amplia y detallada para investigar, mediante análisis más solventes, por qué algunos ET afectan a las personas en forma diferenciada y si algunas variables localizadas territorialmente podrían ayudar a explicar estas brechas.

Asimismo, la implementación del modelo con datos nacionales ofrece datos novedosos e inéditos a investigadores y analistas sobre diversas estimaciones a nivel espacial y temporal sobre cinco conjuntos informativos:

1. La *distribución y evolución de los ET* a lo largo del tiempo en la República Mexicana en las escalas nacional, estatal y municipal.
2. Las *funciones empíricas de densidad y distribución de los ET* por edad y sexo y su evolución territorial.
3. Las estimaciones de la *familia de parámetros* asociados con la construcción de las matrices de incidencia, letalidad, morbilidad y mortalidad.
4. Las *intensidades del riesgo* para cada clase de evento y tipo de usuario.
5. Los *años potenciales de vida perdida* y el sistema de equivalencias entre edades.

Lo anterior establece una nueva situación con, al menos, tres ventajas respecto a los datos disponibles hoy día: 1) un marco analítico más robusto para la interpretación de los resultados, 2) un método más solvente para estimar el tiempo potencial de vida perdida, que moderniza las técnicas de estimación e incorpora los conceptos de privación absoluta y relativa en su interpretación, y 3) un conjunto amplio de datos novedosos e inexistentes que son necesarios para conocer diversos aspectos del riesgo por DT y formular hipótesis de naturaleza estadística.

De esta manera, el abordaje conjunto de estos desafíos en materia de transporte ofrece la posibilidad de identificar y separar los efectos de las variaciones entre la edad, las cohortes y los periodos de análisis, coadyuvando así a resolver uno de los mayores pendientes en los estudios longitudinales sobre ET: distinguir entre el efecto de las condiciones geográficas, socioeconómicas y demográficas —acotados en el tiempo y el espacio— y el impacto de determinadas intervenciones en la morbilidad y mortalidad observadas, lo que podría coadyuvar en la disminución de los frecuentes errores

metodológicos y las múltiples confusiones en la evaluación e interpretación de resultados de ciertas acciones, intervenciones, programas y políticas públicas.

Desde luego, dado que ningún indicador puede capturar todos los aspectos relevantes de los ET, otra ventaja de desarrollar exitosamente el nuevo modelo es que se abriría una nueva veta de investigación para diseñar indicadores concurrentes y subrogantes basados en registros, lo que complementaría el conjunto informativo y el conocimiento existente sobre los riesgos latentes asociados a la ocurrencia de ET, brindando herramientas adicionales para analizar sus distribuciones espacio-temporales, así como conocer su impacto en las dinámicas demográficas.

Por último, la caracterización de los distintos grupos de población mediante una tipología y niveles de vulnerabilidad —basadas en las estimaciones paramétricas de sus riesgos específicos— podría aportar evidencias a la discusión pública y la toma de decisiones sobre diversas acciones, estrategias y directrices sobre la movilidad, así como facilitar la simulación de los efectos potenciales de ciertas regulaciones e intervenciones con base en la mejor evidencia disponible.

Referencias

- Abarca, F. C. (2008). Manual Centromericano de Seguridad Vial. *I CONGRESO IBEROAMERICANO DE SEGURIDAD VIAL*. San José: CISEV. Obtenido de http://www.institutoivia.com/cisev-ponencias/medicion_gestion_gs/Fredy_Carvajal.pdf
- Aburto, J. M.-S. (2019). Upsurge of homicides and its impact on life expectancy and life span inequality in Mexico, 2005–2015. *American journal of public health, 109*(3), 483-489.
- Ackerman, E. (1975). Las fronteras de la investigación geográfica. *Geo Crítica: cuadernos críticos de geografía humana*.
- Akerlof, G. A. (1978). The market for “lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. In *Uncertainty in economics* (pp. 235-251). Academic Press.
- Allaben, M., Diamantoukos, C., Dicke, A., Gutterman, S., Klugman, S., Lord, R., ... & Tan, J. (2008, July). Principles underlying actuarial science. In *Actuarial Practice Forum*.
- Almanza, A. S. (2016). Sistema de ciudades y redes urbanas en los modelos económicos de México. *Problemas del desarrollo, 47*(184), 7-34.
- Andreuccetti et al, G. C. (2011). Reducing the legal blood alcohol concentration limit for driving in developing countries: a time for change? Results and implications derived from a time–series analysis (2001–10). *Addiction, 2124-2131*.
- Arnoso Martínez, A., Vozmediano Sanz, L., & Martínez de Taboada Kutz, C. (2018). Inseguridad subjetiva y representaciones sociales de la delincuencia. *Universitas Psychologica, 17*(2), 1-14. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy.17-2.isrs>
- Aven, T. (2013). A conceptual framework for linking risk and the elements of the data–information–knowledge–wisdom (DIKW) hierarchy. *Reliability Engineering & System Safety, 111*, 30-36.
- Ávila-Burgos L, A.-G. B.-A.-Q. (2011). Consecuencias económicas de las lesiones por accidente de tránsito para el sistema de salud mexicano. *14 Congreso de Investigación en Salud Pública*. Cuernavaca: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Badea-Romero, A. L. (2013). Source of head injury for pedestrians and pedal cyclists: Striking vehicle or road? *Accident . Analysis and Prevention, 1140-1150*.
- Beck, U. (1992). *Risk society: towards a new modernity*. Sage.
- Beck, U. (2006). *La sociedad del riesgo global*. Madrid: Siglo XXI.
- Beck, U. (2010). Risk Society and China: A dialogue with Ulrich Beck. *Sociological Studies, 208-231*.
- Beck, U. (2012). Global risk society. *The Wiley-Blackwell Encyclopedia of Globalization*. Wiley-Blackwell.
- Beck, U., & Giddens, A. L. (1997). *Modernización reflexiva. Política, tradición y estética en el orden social moderno*. Madrid: Alianza.
- Behrens, K., & Picard, P. M. (2011). Transportation, freight rates, and economic geography. *Journal of International Economics, 85*(2), 280-291.

- Berrones-Sanz, L. D. (2017). Análisis de los accidentes y las lesiones de los motociclistas en México. *Gac Med Mex*, 153(6), 662-71.
- Bertotti, E. (2 de Septiembre de 2018). *Bases para la seguridad vial*. Obtenido de Movilidad segura ISEV: <http://movilidadseguraisev.blogspot.com/2009/06/seguridad-vial-bases-para-su.html>
- Blaizot, S. P. (2013). Injury incidence rates of cyclists compared to pedestrians, car occupants and powered two-wheeler riders, using a medical registry and mobility data, Rhone County, France. *Accident Analysis and Prevention*, 35-45.
- Bonfim, C. V. (2012). Characterization of motorcycle accident victims attended by the mobile emergency service (SAMU-192), Recife, Pernambuco State, Brazil. *Acta Scientiarum. Health Sciences*, 34, 239-246.
- Borsboom, D., Mellenbergh, G. J., & Van Heerden, J. (2003). The theoretical status of latent variables. *Psychological review*, 110(2), 203.
- Borsboom D. Latent Variable Theory. *Meas Interdiscip Res Perspect* 2008; 29; 6(1-2): 25-53.
- Bosq, D. (2012). *Nonparametric statistics for stochastic processes: estimation and prediction (Vol. 110)*. Springer Science & Business Media.
- Box, G.E.P. and Draper, N.R. (1987). *An Accidental Statistician: The Life and Memories of George E.P. Box*, New York: Wiley.
- Brüde, U., Larsson, J., 1993. Models for predicting accidents at junctions where pedestrians and cyclists are involved. How well do they fit?. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 25, No. 5, pp. 499-509.
- Bühlmann, H. (2007). *Mathematical methods in risk theory*. Springer Science & Business Media.
- Bunge, M. (1981), *La ciencia: su método y su filosofía*. Buenos Aires: Ediciones siglo XXI.
- Burns, T. a. (2016). *Governing Education in a Complex World, Educational Research and Innovation*. Paris: OECD Publishing. doi:<http://dx.doi.org/10.1787/9789264255364-en>
- Cairncross, F. 1997. *The death of distance: How the communications revolution will change our lives*. Boston: Harvard Business School Press.
- Campbell, N. R. (1920). *Physics: The Elements*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cavalcanti, A. L., Lucena, B., Rodrigues, I. S., Silva, A. L., Lima, T. T., & Xavier, A. F. C. (2013). Motorcycle accidents: morbidity and associated factors in a city of northeast of Brazil. *Tanzania journal of health research*, 15(4).
- Cervantes Trejo, A. (2009). Accidentes de tránsito. *Asunto de Estado y Salud Pública. Movilidad Amable*, 100-101.
- Cervantes-Trejo, A. (2016). Trends in traffic fatalities in Mexico: examining progress on the decade of action for road safety 2011–2020. *International journal of public health*, 61(8), 903-913.
- Chandran, A. (2014). Early impact of a National Multi-Faceted Road Safety Intervention Program in Mexico: results and implications from a time-series analysis. *PLoS One*, 9(1):e87482

- Chávez, E. R., Calleros, C. A. F., González, R. L., & García, E. R. (2016). Bibliografía sobre migración en tránsito irregular.
- Chias et al, A. B.-R. (2009). *Diagnóstico espacial de los AT en el Distrito Federal*. DF: Secretaría de Salud.
- Chias L. (2009). *Diagnóstico espacial de los accidentes de tránsito en el Distrito Federal*. DF: CENAPRA. Gobierno Federal.
- Chias, L. (2020). Nota de trabajo para el proyecto ‘ecosistema de la seguridad vial en México’. GITS, Instituto de Geografía, UNAM.
- Chong, S. P. (2010). Relative injury severity among vulnerable non-motorised road users: Comparative analysis of injury arising from bicycle-motor vehicle and bicycle-pedestrian collisions. *Accident Analysis and Prevention*, 290-296.
- Chong, S., Poulos, R., Olivier, J., Watson, W. L., & Grzebieta, R. (2010). Relative injury severity among vulnerable non-motorised road users: comparative analysis of injury arising from bicycle–motor vehicle and bicycle–pedestrian collisions. *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), 290-296.
- Christoforou, Z. K. (2013). Reaction times of young alcohol impaired drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 54-62.
- Cobiac, L., Vos, T., Doran, C., & Wallace, A. (2009). Cost-effectiveness of interventions to prevent alcohol-related disease and injury in Australia. *Addiction*, 104(10), 1646-1655.
- Cocho, G., & Miramontes, P. (2000). Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados. *Ciencias*, (059).
- Coria, S. R. (2016). Open Data on Road Traffic Incidents in Mexico City: Current Situations and Perspectives. En R. C. Arts, *The Pursuit of Legible Policy: Agency and Participation in the Complex Systems of the Contemporary Megalopolis* (págs. 153- 164). México: Newton Fund, British Council, CONACYT, IIMAS-UNAM, Laboratorio para la Ciudad, Future Cities Catapult, Superflux.
- Correa O., C. M., & Guillén M., L. M. (2011). La teoría de la individualización y el enfoque en ciencia, tecnología y sociedad (CTS). *Escritos*, 143-160
- Cushman, F. (2020). Rationalization is rational. *Behavioral and Brain Sciences*, 43
- da Costa, F., da Silva, L. M., Correia, R. A., Furtado, B.
- Dalal K, L. Z. (2013). Economics of global burden of road traffic injuries and their relationship with health system variables. *Int J Prev Med*, 12(4), 1442.
- Danaf, M. A.-Z. (2015). Modeling anger and aggressive driving behavior in a dynamic choice-latent variable model. *Accident Analysis and Prevention*, 105-118.
- Davis, R. M., & Pless, B. (2001). BMJ bans “accidents”: Accidents are not unpredictable.
- De Martino, B., Kumaran, D., Seymour, B., & Dolan, R. J. (2006). Frames, biases, and rational decision making in the human brain. *Science*, 313(5787), 684-687.
- De Regt, H. W. (2005). A contextual approach to scientific understanding. *Synthese*, 144(1), 137-170.

- Derrick, B., & White, P. (2017). Comparing two samples from an individual Likert question. *International Journal of Mathematics and Statistics*, 18(3).
- De Sousa Santos, B. (2004). Reinventar la democracia: reinventar el Estado. Editorial Abya Yala.
- Dingle, H. (1950). A theory of measurement. *Br. J. Philos. Sci.* 1, 5–26. doi: 10.1093/bjps/I.1.5
- Dobson, A. J., & Barnett, A. G. (2018). An introduction to generalized linear models. CRC press.
- Doll L, B. T. (2003). Evaluation of interventions designed to prevent and control injuries. *Epidemiological Review*, No. 25. p. 51-59.
- Dong, C. S. (2018). An improved deep learning model for traffic crash prediction. *Journal of Advanced Transportation*.
- Du, Y., & Mak, C. M. (2018). Improving pedestrian level low wind velocity environment in high-density cities: A general framework and case study. *Sustainable cities and society*, 42, 314-324.
- Efrén Murillo-Zamora et al, O. M.-C.-H.-E.-G.-P.-R. (2017). Expected years of life lost through road traffic injuries in Mexico. *Global Health Action*, 10:1. doi:10.1080/16549716.2017.1360629
- Eguchi, T. B. (2017). Impact of increasing age on cause-specific mortality and morbidity in patients with stage I non-small-cell lung cancer: a competing risks analysis.
- Ekman, L., 1996. On the Treatment of Flow in Traffic Safety Analysis, a non-parametric approach applied
- Elvik, R., 2014. Towards a general theory of the relationship between exposure and risk. TOI report 1316/2014.
- Elvik, R., & Goel, R. (2019). Safety-in-numbers: An updated meta-analysis of estimates. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 136-147.
- Fairley L, Cabieses B, Small N, Petherick ES, Lawlor DA, Pickett KE, et al. Using latent class analysis to develop a model of the relationship between socioeconomic position and ethnicity: cross-sectional analyses from a multi-ethnic birth cohort study. *BMC Public Health* 2014; 14 (1): 835.
- Fingleton, B. (2000). Spatial econometrics, economic geography, dynamics and equilibrium: a 'third way'? *Environment and planning A*, 32(8), 1481-1498.
- Francesi, G. d. (2002). Les Pensées de Pascal : du dessein à l'édition. *Université LUMSA*, Rome.
- Forfar, D. O. (2014). Mortality laws. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1-11
- Freidlin B, Korn EL. Testing treatment effects in the presence of competing risks. *Stat Med*. 2005; 24:1703–12.
- Galindo, L. D. (2005). Tráfico Inducido en México: contribuciones al debate e implicaciones de política pública. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 123-157
- Galván, L. E. L. (2012). Los inicios de la formación de profesores en México (1821-1921). *História da Educação*, 16(38), 43-62.
- Garretsen, H., & Martin, R. (2010). Rethinking (new) economic geography models: taking geography and history more seriously. *Spatial Economic Analysis*, 5(2), 127-160.
- Gates, K. M., Fisher, Z. F., & Bollen, K. A. (2020). Latent variable GIMME using model implied instrumental variables (MIIVs). *Psychological methods*, 25(2), 227.

- Gómez-García, L. (2014). Impacto de la reforma en la legislación sobre consumo de alcohol y conducción en Guadalajara y Zapopan, Jalisco, México: una mirada en el corto plazo. *Cadernos de Saúde Pública*, 30, 1281-1
- González-Pérez, G. J., Vega-López, M. G., & Cabrera-Pivaral, C. E. (2015). Mortality due to traffic injuries and its impact on life expectancy: a comparison between Mexico and Spain. *Gaceta sanitaria*, 29, 70-75.
- Gottdiener, M., & Feagin, J. R. (2015). El cambio de paradigmas en la sociología urbana. *Sociológica México*, (12).
- Guerrero-López, C. (2013). Impacto del consumo nocivo de alcohol en accidentes y enfermedades crónicas en México. *Salud pública de México*, 282-288.
- Gumbel, E. J. (2012). *Statistics of extremes*. Courier Corporation.
- Gupta, A., & Mishra, A. K. (2018). Analysis & Prediction of Road Accident Data for Indian States. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(21), 14841-14845.
- Gut A., *Probability: a graduate course*, Springer, 2005.
- Gutiérrez, A. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Bitácora* 21, 61-74. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/30288/1/29076-167002-1-PB.pdf>
- Haberman, S. &. (2018). *Actuarial models for disability insurance*. London: Routledge.
- Haigh, I. D., & Wahl, T. (2019). *Advances in extreme value analysis and application to natural hazards*.
- Hall, W. (2010). What are the policy lessons of National Alcohol Prohibition in the United States, 1920–1933? *Addiction*, 105(7), 1164-1173.
- Henning, M. (2019). Time should tell (more): evolutionary economic geography and the challenge of history. *Regional Studies*, 53(4), 602-613.
- Hidalgo-Solorzano E. et al., H. M. (2009). Motivos de uso y no uso de puentes peatonales en la Ciudad de México: la perspectiva de los peatones. *Salud Pública Me*.
- Hidalgo-Solorzano E., (2009). *Motivos de uso y no uso de puentes peatonales en la Ciudad de México: la perspectiva de los peatones*. Cuernavaca: Salud Pública Mex.
- Híjar et al, R. (2018). Advances in Mexico in the middle of the Decade of Action for Road Safety 2011–2020. *Saude Pub*, 52:67.
- Híjar M., (2012). Quantifying the underestimated burden of road traffic mortality in Mexico: a comparison of three approaches. *Traffic Inj Prev*, 13 Suppl 1:5-10.
- Híjar, M. M. (2004). Enfrentando los retos a través de una visión intersectorial. *Foro Nacional sobre accidentes de tránsito en México*. DF: CONAPRA.
- Hilbe, J. M. (2009). *Logistic regression models*. CRC press.
- Hollingworth, M. H. (2015). Risk factors for cycling accident related injury: The UK Cycling for Health Survey. *Journal of Transport & Health*.

- Hoffmann, M., & Vetter, M. (2017). Weak convergence of the empirical truncated distribution function of the Lévy measure of an Itô semimartingale. *Stochastic Processes and their Applications*, 127(5), 1517-1543.
- Huang, H., He, Y., & Chen, J. (2019). Competitive strategies and quality to counter parallel importation in global market. *Omega*, 86, 173-197.
- INEGI. (2019). *Estadísticas Vitales – Defunciones fetales*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/programas/mortalidad/>
- INEGI. Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas (ATUS). Anual, 1997-2018.
- INEGI (2019) <https://datos.gob.mx/busca/dataset?tags=pol%C3%ADgonos>
- Jacobsen, P. L., & Rutter, H. (2012). *Cycling safety* (Vol. 2007, pp. 141-156). Cambridge, MA: MIT Press.
- James Joseph O'Toole futurology, <https://www.britannica.com/topic/futurology>
- Janstrup, K. H. (2017). Road Safety Annual Report 2017.
- Jean Tricart & Jean Killian." *La eco-geografía y la ordenación del medio natural*. Anagrama, Barcelona, 1982, 288 pp.(trad. J. Jordá, C. Nieto, N. Pérez de Lara).
- Jung, S. S., & Jang, S. S. (2019). To cluster or not to cluster?: Understanding geographic clustering by restaurant segment. *International Journal of Hospitality Management*, 77, 448-457.
- Johnson, J., Ormerod, P., Rosewell, B., Nowak, A., & Zhang, Y. C. (2017). Non-equilibrium social science and policy. *Non-Equilibrium Social Science and Policy*, 1.
- Jonsson, T., 2013. Safety Performance Models for Pedestrians and Bicyclists. Proceedings of the 16th International Conference Road Safety on Four Continents, Beijing, China. 15-17 May
- Komada, Y., Asaoka, S., Abe, T., Inoue, Y., 2013. Short sleep duration, sleep disorders, and traffic accidents. *IATSS Research* 37, pp. 1-7.
- Kaas, R. G. (2008). *Modern actuarial risk theory: using R (Vol. 128)*. Springer Science & Business Media.
- Karlsson, C., ed. 2008. *Handbook of research on cluster theory*. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Kerr, W. C. (2018). Trends and age, period and cohort effects for marijuana use prevalence in the 1984–2015 US National Alcohol Surveys. *Addiction*, 473-481.
- Koehler, E. (2020). Human Decision-Making beyond the rational decision theory. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(1), 4-6.
- Koh, P. P., Wong, Y. D., & Chandrasekar, P. (2014). Safety evaluation of pedestrian behaviour and violations at signalised pedestrian crossings. *Safety science*, 70, 143-152.
- Kuhn, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de cultura económica.
- Kuhn, T. (1989). *¿Qué son las revoluciones científicas? Y otros ensayos*. Barcelona: Paidós.
- Lam, C., Pai, C. W., Chuang, C. C., Yen, Y. C., Wu, C. C., Yu, S. H., ... & Chiu, W. T. (2019). Rider factors associated with severe injury after a light motorcycle crash: A multicentre study in an emerging economy setting. *PLoS one*, 14(6), e0219132.

- Lassarre, S. B. (2012). A GIS-based methodology for identifying pedestrians' crossing patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(4), 321-330.
- Latouche, A. A. (2013). A competing risks analysis should report results on all cause-specific hazards and cumulative incidence functions. *Journal of clinical epidemiology*, 66(6), 648-653.
- Lawson, G. (2006). La imaginación sociológica desde la. *LSE Research On line*, 1-33.
- Lawler G. F., Introduction to stochastic processes, Chapman & Hall / CRC, 2006.
- Lawson, T. (2008). Social explanation and Popper. En *Popper and Economic Methodology: Contemporary Challenges* (págs. 87-112). London and New York: Routledge.
- Leland, H. E. (1979). Quacks, lemons, and licensing: A theory of minimum quality standards. *Journal of political economy*, 87(6), 1328-1346.
- Leonardo, J. (2014). *Lexicon Latin*. Bilbao: Universidad de Deusto.
- Lima-Serrano, M., Sáez-Bueno, A., Cáceres-Rodríguez, B., & Lima-Rodríguez, J. S. (2013, August). Diseño y validación de escalas para medir la actitud adolescente hacia: sexualidad, sustancias adictivas y seguridad vial:¿ Se relacionan con los comportamientos?. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 36, No. 2, pp. 203-215). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Long, Y., Han, H., Tu, Y., & Shu, X. (2015). Evaluating the effectiveness of urban growth boundaries using human mobility and activity records. *Cities*, 46, 76-84.
- Luhmann, N. (2006). Sociología del Riesgo. *Universidad Iberoamericana*.
- Liu, S., & Forrest, J. Y. L. (2010). Grey systems: theory and applications. Springer Science & Business Media.
- Lozano A. Lesiones por vehículos en México. Fuentes y sistemas de información existentes. En: Hajar M, Vázquez E, comp. Foro nacional sobre accidentes de tránsito en México. Enfrentando los retos a través de una visión intersectorial. México 2003:15-21.
- Luping, Y., & Dalin, Q. I. A. N. (2012). Vulnerability analysis of road networks. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(1), 105-110.
- Maibach, M. C. (2008). Handbook on Estimation of External Cost in the Transport Sector. *CE Delft*.
- Mannering, F.L., Bhat, C.R., 2014. Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic Methods in Accident Research* 1, pp. 1-22.
- Mapelli, E. (1987). *Régimen jurídico del transporte*. MADrid: Ministerio de Justicia.
- Martínez-Mekler, G., Martínez, R. A., del Río, M. B., Mansilla, R., Miramontes, P., & Cocho, G. (2009). Universality of rank-ordering distributions in the arts and sciences. *PLoS One*, 4(3), e4791.
- McFarlane, A. (17 de Agosto de 2010). *How the UK's first fatal car accident unfolded*. Obtenido de BBC News Magazine: <https://www.bbc.com/news/magazine-10987606>
- Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/trade-off>. Accessed 2 Oct. 2020.

- México. (6 de junio de 2011). Acuerdo Federal. *Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020*. DF, Distrito Federal, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (MX); Secretaría de Salud (MX). Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5
- Milosavljevic, V. (2007). Estadísticas para la equidad de género: magnitudes y tendencias en América Latina. Cepal.
- Mina-Valdés, A. (2009). Uso de las funciones de supervivencia en las ciencias sociales y en los estudios de población: Aplicación al caso de México. *Papeles de población*, 15(61), 53-74.
- Miriam, A. (2017). Environmental risk: Ulrich Beck's contribution. *Acta Sociológica*, 171-194.
- Miyasaka Y, Barnes ME, Petersen RC, Cha SS, Bailey KR, Gersh BJ, et al. Risk of dementia in stroke-free patients diagnosed with atrial fibrillation: data from a community-based cohort. *Eur Heart J*. 2007;28:1962–7.
- Morgan, B. J. (2018). *Elements of simulation*. Routledge
- Mondéjar-Jiménez, J., & Vargas-Vargas, M. (2008). Indicadores sintéticos: una revisión de los métodos de agregación. *Economía, sociedad y territorio*, 8(27), 565-585.
- Muro-Báez, V. (2017). Análisis de las lesiones causadas por el tránsito sufridas por ciclistas en México. *Gac Med Mex*, 153(6):653-61. Obtenido de <http://www.medigraphic.com/pdfs/gaceta/gm-2017/gm176b.pdf>
- Murray, C. J., Lopez, A. D., & World Health Organization. (1996). *The global burden of disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Boston (MA): Harvard University Press.
- Nantulya VM et al. The global challenge of road traffic injuries: can we achieve equity in safety? *Injury Control and Safety Promotion*, 2003, 10:3–7.
- Nasir, J. A., & Tahir, M. H. (2011). A statistical assessment of demographic bonus towards poverty alleviation. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)*, 5(1), 1-11.
- Nazif, J. (2011). *Guía práctica para el diseño e implementación de políticas de seguridad vial integrales, considerando el rol de la infraestructura*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Neira J, B. L. (2004). The Word “Accident”: No Chance, No Error, No Destiny. *Prehospital and disaster medicine*, 19(3):188, 9.
- Nguyen-Phuoc, D. Q., Nguyen, H. A., De Gruyter, C., Su, D. N., & Nguyen, V. H. (2019). Exploring the prevalence and factors associated with self-reported traffic crashes among app-based motorcycle taxis in Vietnam. *Transport policy*, 81, 68-74.
- Oikawa, S., Hirose, T., Aomura, S., & Matsui, Y. (2016). *Traffic accidents involving cyclists identifying causal factors using questionnaire survey, traffic accident data, and real-world observation* (No. 2016-22-0008). SAE Technical Paper.
- Negroponte, N. 1995. *Being digital*. London: Vintage Books.
- Oberaigner, W. (2007). Errors in survival rates caused by routinely used deterministic record linkage methods. *Methods of information in medicine*, 46(04), 420-424.
- O'Brien, R. 1992. *Global financial integration: The end of geography*. London: Pinter.

- Oehmen, J. O.-D. (2014). Analysis of the effect of risk management practices on the performance of new product development programs. *Technovation*, 441–453. doi:10.1016/j.technovation.2013.12.005
- Oehmen, J. O.-D. (2014). Analysis of the effect of risk management practices on the performance of new product development programs. *Technovation*, 34(8), 441-453.
- Omar B Ahmad, C. B.-P. (2001). *Age standardization of rates: a new WHO standard*. World Health Organization, 2001. Obtenido de <http://www.who.int/healthinfo/paper31.pdf>
- ONU —Organización de las Naciones Unidas (2016). Declaración de Incheon y Marco de Acción ODS 3 – Educación 2030.
- ONU. (2010). *Resolution adopted by the General Assembly: 64/255: improving global road safety*. New York: United Nations General Assembly. Obtenido de http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/UN_GA_resolution-54-255-en.p
- ONU. (2010). *Resolution adopted by the General Assembly: 64/255: improving global road safety*. New York: United Nations General Assembly. Obtenido de Disponible en: http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/UN_GA_resolution-54-255-en.pd
- ONU. (2015). *Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015*. New York: Asamblea General de las Naciones Unidas.
- ONU. (2015). *Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015*. New York: Organización de las Naciones Unidas.
- OPS. (2009). *Propuesta metodológica de armonización de la información de siniestros de tránsito en Iberoamérica*. Washington, DC: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS. (2016). *La seguridad vial en la Región de las Américas*. Washington, DC: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS. (2016). *Regional mortality database*. Washington, DC: Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9155&Itemid=40096&lang=en&limitstart=1
- Ouellet, J. V. (2011). Helmet use and risk compensation in motorcycle accidents. *Traffic injury prevention*, 12(1), 71-81.
- Paefgen, J. S. (2014). Multivariate exposure modeling of accident risk: Insights from Pay-as-you-drive insurance data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27-40.
- Papadimitriou et al, E. L. (2016). Introducing human factors in pedestrian crossing behaviour models. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 69-82.
- Pasanen, E., 1992. *Driving Speeds and Pedestrian Safety: A mathematical Model*. Helsinki University of Technology, Transport Engineering, Publication 77, Finland.
- Pedrero, V., Cabieses, B., & Bernales, M. (2015). El potencial de las variables latentes en investigación en Salud. *Revista médica de Chile*, 143(6), 814-815.

- Peng, Y. C. (2012). A study of pedestrian and bicyclist exposure to head injury in passenger car collisions based on accident data and simulations. *Safety Science* 50, 1749-1759.
- Pérez, M. R. (2011). ¿ Se debe usar el término accidente en el ámbito de la investigación científica?. *Panace*, 12(33), 84-88.
- Pérez-Núñez R, H. M.-S. (2012). *Lesiones causadas por el tránsito: hora de poner el freno*. Cuernavaca: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Pérez-Núñez R, H.-S. E.-L. (2014). The prevalence of mobile phone use among motorcyclists in three Mexican cities. *Traffic Inj Prev*, 15:148-50.
- Pérez-Núñez R. et al, C. A.-L. (2013). The use of seatbelts and child restraints in three Mexican cities. *Int J Inj Contr Saf Promot*, 20:385-93.
- Pintilie M. *Competing risks: A practical perspective*. 1st ed. Chichester: Wiley; 2006.
- Pintilie, M. (2011). An introduction to competing risks analysis. *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, 64(7), 599-605.
- Popper, K. R. (2003), *Conjeturas y refutaciones: el desarrollo del conocimiento científico*. Barcelona: Paidós.
- Porchia, B. R., Baldasseroni, A., Dellisanti, C., Lorini, C., & Bonaccorsi, G. (2014). Effectiveness of two interventions in preventing traffic accidents: a systematic review. *Ann Ig*, 26(1), 63-75.
- Pumain, D. (2017). Geography far from equilibrium. In *Non-Equilibrium Social Science and Policy* (pp. 71-80). Springer, Cham.
- Ramírez Muñoz, J. E. (2013). Accidentes de tránsito terrestre. *Medicina Legal de Costa Rica*, 30(2), 78-85.
- Rinne, H. (2008). *The Weibull distribution: a handbook*. CRC press.
- Rizzi LI, C. S. (2011). Cost-effective measures for reducing road fatalities in the short term. *Transport Rev*, 31(1), 1-24. doi:<https://doi.org/10.1080/01441641003736572>
- Road Safety. (02 de Septiembre de 2018). *History*. Obtenido de Road Safety: <https://web.archive.org/web/20060618183408/http://www.roadsafety.cardiff.gov.uk/history>
- Road Safety Collaboration. (18 de Mayo de 2019). *Fourth United Nations Global Road Safety Week*. Obtenido de Road Safety Week: <http://www.who.int/roadsafety/week/2017/en/>
- Rodrigues J. et al., V. A. (2014). Trends in fatal motorcycle injuries in the Americas, 1998–2010. *Int J Inj Contr Saf Promot*, 21(2), 170–180.
- Rosén, E., 2013. Autonomous Emergency Braking for Vulnerable Road Users. Paper no. RC-13-71, Proceedings of the 2013 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury, Gothenburg, Sweden.
- Rosén, E., Sander, U., 2010. Influence of impact speed estimation errors on pedestrian fatality risk curves. In: 4th International Conference ESAR Expert Symposium on Accident Research, Germany.
- Roth, S. R. (2010). Finite element modelling of paediatric head impact: global validation against experimental data. *Computer methods and programs in biomedicine*, 99(1), 25-33.

- Rothe, J. P. (2020). *The safety of elderly drivers: Yesterday's young in today's traffic*. Routledge.
- Rubtzov, V. A., Gabdrakhmanov, N. K., Delabarr, O. A., & Tyabina, D. V. (2015). Equilibrium tasks in geography. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 6(3), 669-669.
- Ruiz Cantero, M. T. (2020). Las estadísticas sanitarias y la invisibilidad por sexo y de género durante la epidemia de COVID-19.
- Saad, P. M., Miller, T., Holz, M., & Martínez, C. (2012). Juventud y bono demográfico en Iberoamérica.
- Sánchez H., (2011). Traffic accidents in Mexico: did the frequency and severity change from 2000 to 2007? . *Inj. Prev.*
- Sánchez-Restrepo, H. (2016). *Resultados Educativos, retos hacia la excelencia*. Quito: Instituto Nacional de Evaluación Educativa.
- Sánchez-Restrepo, H. (2018). *Evolución de la edad promedio de defunción por accidentes de tránsito*.
- Sánchez-Restrepo, H. (2008). Dinámica de los AT en la Ciudad de México: un enfoque desde los -Sistemas Complejos. *Primer Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial*. San José: CISEV. Instituto Vial Iberoamericano.
- Sánchez-Restrepo, H. (2020). Privación del aprendizaje: desigualdad educativa en México y América Latina. (INIDE-UIA, Ed.) *Faro Educativo*(Apunte de política N° 4).
- Sánchez-Restrepo, H. C. (2010). Traffic accidents in Mexico: did the frequency and severity change from 2000 to 2007? *Injury Prevention*, 16(1), A41.
- Sánchez-Restrepo, H. C. (2015). Evolución de los accidentes de tránsito en México: un proceso de magnificación del riesgo. *IV Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial*. Cancún: Instituto Vial Iberoamericano.
- Sánchez-Restrepo, H. C. (2019). Evolución de los accidentes de tránsito en las zonas urbanas y suburbanas de México en el periodo 1997-2016: mayor exposición al riesgo y menor letalidad. *Rev Ger y Pol Salud, Jul-Dic*(15(37)).
- Sánchez, F. (2008). Actitudes frente al riesgo vial. *Psychosocial Intervention*, 17(1), 45-59.
- Shearmur, R. (2007). The new knowledge aristocracy: the creative class, mobility and urban growth. *Work Organisation, Labour and Globalisation*, 1(1), 31-47.
- Skoog, G. R., & Ciecka, J. E. (2006). Worklife expectancy via competing risks/multiple decrement theory with an application to railroad workers. *Journal of Forensic Economics*, 19(3), 243-260
- Schober, P., Bossers, S. M., & Schwarte, L. A. (2018). Statistical significance versus clinical importance of observed effect sizes: what do P values and confidence intervals really represent?. *Anesthesia and analgesia*, 126(3), 1068.
- SCT; SSA. (6 de Junio de 2011). Acuerdo por el que se da a conocer la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020. CDMX, CDMX, México.
- Silvi, J. (December de 2003). On the estimation of mortality rates for countries of the Americas. *Epidemiological Bulletin*, 1-5. Recuperado el 1 de Agosto de 2019, de http://www.paho.org/english/dd/ais/EB_v24n4.pdf

- Shinar, D. (2012). Safety and mobility of vulnerable road users: Pedestrians, bicyclists, and motorcyclists.
- Singpurwalla, N. D. (2006). On competing risk and degradation processes. *Optimality, Institute of Mathematical Statistics*, 229-240
- Silberner, J. (2019). Road injuries: tackling the leading killer of young people. *BMJ: British Medical Journal (Online)*, 364
- Smeed, R. (1949). "Algunos aspectos estadísticos de la investigación en seguridad vial". *Revista de la Royal Statistical Society. Serie A (General)* . *Revista de la Royal Statistical Society. Serie A (General)*, Vol. 112, núm. 1. 112 (1): 1–34. doi : 10.2307 / 2984177 . JSTOR 2984177
- Stevens, I., & Hassett, P. (2012). Non-linear perspectives of risk in social care: using complexity theory and social geography to move the focus from individual pathology to the complex human environment. *European Journal of Social Work*, 15(4), 503-513
- Tabasso, C. (2009). *Paradigmas, teorías y modelos de la seguridad*. Buenos aires: Instituto IVIA
- Thompson, Jason; Savino, Giovanni; Stevenson, Mark (2015-02-17). "Reconsidering the Safety in Numbers Effect for Vulnerable Road Users: An Application of Agent-Based Modeling". *Traffic Injury Prevention*. **16** (2): 147–153. doi:10.1080/15389588.2014.914626. ISSN 1538-9588. PMID 24761795.
- Thompson, Jason; Wijnands, Jasper S.; Savino, Giovanni; Lawrence, Brendan; Stevenson, Mark (2017-08-01). "Estimating the safety benefit of separated cycling infrastructure adjusted for behavioral adaptation among drivers; an application of agent-based modelling". *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. **49**: 18–28. doi:10.1016/j.trf.2017.05.006. ISSN 1369-8478.
- Thompson, Jason; Savino, Giovanni; Stevenson, Mark (2016-03-01). "A model of behavioural adaptation as a contributor to the safety-in-numbers effect for cyclists". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. **85**: 65–75. doi:10.1016/j.tra.2015.12.004. ISSN 0965-8564
- Toroyan, T. (2009). *Global status report on road safety*. Geneva: World Health Organization.
- Transport safety performance in the EU: a statistical overview. Bruselas, European Transport Safety Council, 2003.
- Vasconcelos A. et al, (2016). Road safety, health and public policy. *Panamerican Health Organization: Environmental and social determinants of health*, 579-602.
- Vázquez-Vela E. Peso de las lesiones debidas a accidentes de tránsito. En: Hajar M, Vázquez E, comp. Foro nacional sobre accidentes de tránsito en México. Enfrentando los retos a través de una visión intersectorial. México 2003:11-14.
- Ventura-Alfaro et al, (2015). Consecuencias económicas de las lesiones por accidente de tránsito para el sistema de salud mexicano. *14 Congreso de Investigación en Salud Pública*. Cuernavaca: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Vera-Lopez JD, P.-N. R.-S. (2013). Distracted driving: mobile phone use while driving in three Mexican cities. *Inj Prev*, 19:276-9.
- Viral Achary, H. N. (2011). The seeds of a crisis: A theory of bank liquidity and risk taking over the business cycle. *Journal of Financial Economics*, 349-366. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2012.05.014

- Wallace, B., Howcroft, J., Goubran, R., Marshall, S., Porter, M. M., Alakel, A., & Knoefel, F. (2018, June). Measuring older driver behaviours with prior and post exposure to collision locations. In 2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (pp. 1-6). IEEE.
- Wansbeek, T., & Meijer, E. (2001). Measurement error and latent variables. *A Companion to Theoretical Econometrics*. Oxford: Basil Blackwell, 162-179.
- Watkins et al, D. N.-P. (2017). Intersectoral policy priorities for health. *Disease Control Priorities*. En *Disease Control Priorities*. New York, NY: The World Bank.
- WHO. (2004). *World report on road traffic injury prevention*. Geneva: World Health Organisation.
- WHO. (2009). *Global status report on road safety: time for action*. Geneva: World Health Organization, Dept. of Violence, Injury Prevention.
- WHO. (2013). *Global status report on road safety 2013: supporting a decade of action*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2014). *NCD global monitoring framework indicator definitions and specifications*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2015). *Declaración de Brasilia. Segunda Conferencia Mundial de Alto Nivel sobre Seguridad: sobre Seguridad Vial: es hora de resultados*. Brasilia.
- WHO. (2015). *Global status report on road safety 2015*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2015). *Global status report on road safety 2015*. Geneva: World Health Organization. Obtenido de Disponible en: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/
- WHO. (2018). *Global status report on road safety 2017*. Geneva: World Health Organization. Obtenido de <http://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- WHO. (2018). *Methods and Data Sources for Life Tables 1990–2015. Global Health Estimates Technical Paper*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2018). *Road traffic injuries*. Geneva: World Health Organization. Obtenido de <http://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- WHO-MCEE. (2017). *Methods and data sources for child causes of death 2000-2016*. Geneva: World Health Organization
- Varadhan R, Weiss CO, Segal JB, Wu AW, Scharfstein D, Boyd C. Evaluating health outcomes in the presence of competing risks a review of statistical methods and clinical applications. *Med Care*. 2010;48:S96–105
- Worldometer (2020). World Population (2019 and historical) - World Population Forecast (2020 and 2050), <https://www.worldometers.info/world-population/#table-historica>
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., & Park, J. (2017). Developing a rear-end crash risk algorithm under fog conditions using real-time data. *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)* (págs. 568-573). IEEE.
- Ye, Z., Zhang, Y., & Lord, D. (2013). Goodness-of-fit testing for accident models with low means. *Accident Analysis and Prevention*, 78-86.

- Yvette Veyret & Jean-Pierre Vigneau (dir.), Géographie physique. Milieux et environnement dans le système terre, A. Colin, 2002, p.7 ISBN 2-200-25-236-6
- Zamarrón, H. (01 de 09 de 2018). Se duplica el número de autos en CdMx en 17 años. CDMX, CDMX, México: Milenio. Obtenido de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/duplica-numero-autos-cdmx-17-anos>
- Zeng, Q., Huang, H., Pei, X., & Wong, S. C. (2016). Modeling nonlinear relationship between crash frequency by severity and contributing factors by neural networks. *Analytic methods in accident research*, 10, 12-25.
- Zhao, P. (2010). Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, 34(2), 236-243.
- ZhouB, Latouche A,RochaV, FineJP (2010) Competing risks regression for stratified data. *Biometrics*.
- Zscheischler et al, J. W. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*. *Nature climate change*, 469.

Año	1987	1988	1989	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Defunciones totales	947,220,541	96,116,960	97,482,584	101,403,987	102,890,474	104,272,444	105,669,369	107,156,391	108,444,845	110,405,454	112,095,386	113,748,671	115,367,432	116,935,670	118,453,929	119,936,411	121,347,800	122,715,165	124,041,731	125,327,797	126,578,507	127,807,507
Defunciones ET	499,569	504,472	510,107	516,473	523,671	531,741	540,709	550,444	560,783	571,706	583,414	603,492	623,157	640,522	651,896	664,424	672,978	682,300	692,330	702,984	714,252	725,035
Defunciones ATUS	6,039	4,886	5,525	5,263	4,976	5,090	5,002	4,439	4,381	4,744	5,456	6,254	7,485	7,835	7,144	7,094	5,469	5,058	4,779	4,636	4,559	4,394
Defunciones ATUS No fatales	248,114	262,687	285,494	311,938	364,869	399,002	424,490	443,607	452,233	471,272	476,279	466,485	428,467	427,267	387,885	390,411	385,772	380,573	382,066	360,051	367,789	365,167
Defunciones ATUS Solo daños	5,117	4,726	4,558	4,217	4,320	4,607	4,439	4,744	4,381	4,744	5,456	6,254	7,485	7,835	7,144	7,094	5,469	5,058	4,779	4,636	4,559	4,394
Defunciones ATUS No fatales	66,512	69,033	70,025	79,246	87,420	90,470	94,825	88,046	100,962	101,171	107,732	104,277	100,075	94,334	87,669	86,269	83,142	80,548	73,970	67,844	64,552	63,168
Defunciones ATUS Solo daños	176,485	189,378	210,743	228,134	273,232	304,212	325,058	351,122	346,890	365,357	363,091	356,451	322,432	327,262	293,700	299,405	298,218	295,857	304,072	288,213	299,408	298,251
ET/DefHT	2.9%	2.9%	2.8%	2.8%	2.8%	2.9%	2.9%	2.9%	3.0%	3.1%	2.7%	2.7%	2.9%	3.0%	2.7%	2.6%	2.5%	2.4%	2.4%	2.4%	2.3%	2.2%
ATUS/DefHT	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	1.0%	1.1%	1.2%	1.2%	1.2%	1.1%	1.2%	1.2%	1.1%	1.1%	1.1%	1.0%	0.6%
ATUS/ET	34%	38%	34%	36%	34%	33%	32%	32%	30%	32%	40%	41%	41%	46%	41%	46%	41%	31%	31%	29%	28%	27%
Defunciones ATUS No fatales	2.1%	1.6%	1.7%	1.5%	1.2%	1.1%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.1%	1.2%	1.4%	1.3%	1.5%	1.2%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
Defunciones ATUS Solo daños	26.8%	26.3%	24.5%	25.4%	24.0%	22.7%	22.3%	19.8%	22.3%	21.5%	22.6%	22.3%	23.4%	22.1%	22.7%	22.1%	21.6%	21.2%	19.4%	18.8%	17.6%	17.3%
Defunciones ATUS Fatales	71.1%	72.1%	73.8%	73.1%	74.9%	76.2%	76.8%	79.2%	76.7%	77.5%	76.2%	76.4%	75.3%	76.6%	75.9%	76.7%	77.3%	77.7%	79.6%	80.0%	81.4%	81.7%
Defunciones ATUS No fatales	0%	-2%	-20%	-29%	-44%	-48%	-47%	-51%	-51%	-51%	-51%	-44%	-40%	-33%	-36%	-28%	-41%	-45%	-47%	-49%	-46%	-50%
Defunciones ATUS Solo daños	0%	1%	3%	4%	3%	5%	5%	8%	11%	8%	9%	7%	8%	7%	8%	7%	8%	9%	9%	12%	13%	15%
Defunciones ATUS Fatales	3.23	1.59	1.70	0.96	0.18	0.46	0.45	0.77	0.89	0.75	0.22	0.13	0.70	0.46	0.10	0.03	0.23	0.41	0.57	0.36	0.62	0.68
Defunciones ATUS No fatales	2.01	1.80	1.08	1.44	0.85	0.32	0.18	0.84	0.18	0.17	0.30	0.18	0.60	0.32	0.08	0.14	0.30	0.14	0.30	1.04	1.25	1.78
Defunciones ATUS Solo daños	2.18	1.82	1.16	1.42	0.76	0.25	0.12	0.85	0.02	0.44	0.25	0.18	0.82	0.12	0.40	0.08	0.15	0.32	1.01	1.19	1.70	1.80
Defunciones ATUS Fatales	157%	71%	82%	29%	13%	17%	18%	13%	14%	13%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Defunciones ATUS Solo daños	54%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
Defunciones ATUS Fatales	0.262%	0.272%	0.293%	0.316%	0.364%	0.393%	0.413%	0.435%	0.438%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%	0.428%
Defunciones ATUS No fatales	0.065%	0.045%	0.055%	0.055%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%	0.045%
Defunciones ATUS Solo daños	0.070%	0.072%	0.072%	0.080%	0.087%	0.089%	0.092%	0.084%	0.095%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%
Defunciones ATUS Fatales	0.186%	0.197%	0.216%	0.231%	0.273%	0.300%	0.316%	0.337%	0.328%	0.341%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%	0.328%
Defunciones ATUS Solo daños	0%	1%	3%	4%	4%	6%	6%	7%	6%	10%	12%	13%	15%	17%	20%	22%	23%	25%	28%	28%	31%	32%
Defunciones ATUS Fatales	0%	6%	15%	26%	47%	61%	71%	79%	82%	90%	92%	88%	73%	73%	72%	73%	73%	73%	73%	73%	73%	73%
Defunciones ATUS Solo daños	0%	-16%	-8%	-11%	-18%	-16%	-10%	-13%	-14%	-7%	7%	13%	16%	16%	11%	12%	7%	-14%	-19%	-21%	-22%	-25%
Defunciones ATUS Fatales	0%	-17%	-9%	-13%	-19%	-16%	-11%	-16%	-16%	-8%	4%	23%	26%	26%	18%	32%	9%	-16%	-23%	-25%	-27%	-30%
Defunciones ATUS Solo daños	0%	4%	5%	19%	31%	36%	43%	32%	52%	52%	62%	57%	62%	62%	42%	32%	30%	25%	21%	11%	2%	-5%
Defunciones ATUS Fatales	0%	1%	3%	4%	4%	6%	7%	9%	10%	12%	13%	15%	17%	20%	22%	23%	25%	27%	28%	30%	31%	32%
Defunciones ATUS Solo daños	6%	15%	26%	47%	61%	71%	79%	82%	90%	92%	88%	73%	73%	72%	73%	73%	73%	73%	73%	73%	73%	73%
Defunciones ATUS Fatales	-17%	-9%	-13%	-18%	-16%	-10%	-13%	-14%	-7%	7%	13%	16%	16%	11%	12%	7%	-14%	-19%	-21%	-22%	-25%	-27%
Defunciones ATUS Solo daños	4%	5%	19%	31%	36%	43%	32%	52%	52%	62%	57%	62%	62%	42%	32%	30%	25%	21%	11%	2%	-5%	-5%
Defunciones ATUS Fatales	1.5%	1.4%	1.3%	1.3%	1.3%	1.4%	1.4%	1.3%	1.4%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.4%	1.3%	1.3%	1.3%	1.2%	1.1%	1.0%
Defunciones ATUS Solo daños	5.9%	8.7%	9.3%	17.0%	9.4%	6.4%	4.5%	1.9%	4.2%	1.1%	-2.1%	-8.1%	-8.1%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%	-9.4%
Defunciones ATUS Fatales	-16.4%	10.3%	-3.6%	-7.5%	2.4%	6.6%	-3.6%	-1.3%	8.3%	15.0%	5.9%	3.2%	-4.8%	0.8%	-17.1%	-6.9%	-5.5%	-3.5%	-0.7%	-4.1%	-2.4%	-2.4%
Defunciones ATUS Solo daños	3.8%	1.4%	10.8%	-4.7%	-5.5%	2.3%	-5.8%	-0.3%	9.2%	12.8%	19.2%	2.4%	-6.6%	11.9%	-31.6%	-7.5%	-5.5%	-3.0%	-1.7%	-3.0%	-3.8%	-3.8%
Defunciones ATUS Fatales	7.5%	11.3%	8.3%	15.8%	11.3%	6.9%	4.8%	-7.1%	14.7%	0.2%	6.3%	-3.3%	-4.0%	-5.7%	-17.0%	-3.6%	-3.1%	-8.2%	-6.3%	-4.9%	-2.1%	
Defunciones ATUS Solo daños	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Anexo B

Año	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Eventos de tráfico	-1.6	-4.4	-1.0	-0.6	0.2	0.7	1.1	1.3	1.3	1.5	1.5	1.5	1.2	0.5	0.4	-0.3	-0.3	-0.5	-0.6	-0.6	-1.0	-1.0	-1.1
Fatales	-1.5	-4.3	-1.0	-0.7	0.2	0.6	0.9	0.9	1.1	1.3	1.3	1.1	1.0	0.8	0.7	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	-1.1	-1.1	-1.2
Defunciones	-1.2	0.1	0.5	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.6	1.6	1.6	1.1	1.7	0.4	-0.8	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
No fatales	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	0.2	0.7	0.8	1.0	0.5	1.2	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.1	-0.3	-0.5	-0.7	-1.2	-1.2	-1.6	-1.8	-1.9
Solo datos	-1.8	-1.6	-1.2	-0.9	0.1	0.7	1.0	1.1	1.3	1.6	1.4	1.2	0.4	0.4	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.8	-0.6	-0.7
Eventos de tránsito	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Eventos de tránsito (x100,000 hab.)	2.43%	1.90%	1.96%	1.69%	1.38%	1.28%	1.28%	1.28%	1.15%	1.17%	1.18%	1.13%	1.60%	1.78%	2.06%	1.40%	1.31%	1.26%	1.21%	1.27%	1.18%	1.18%	1.15%
No fatales (x100,000 hab.)	2.7%	2.6%	2.5%	2.5%	2.8%	2.8%	2.8%	2.2%	2.0%	2.2%	2.1%	2.3%	2.2%	2.3%	2.2%	2.2%	2.2%	2.1%	1.9%	1.9%	1.8%	1.7%	1.7%
Solo datos (x100,000 hab.)	71%	72%	74%	73%	75%	76%	77%	75%	77%	77%	78%	76%	76%	75%	77%	77%	77%	77%	78%	78%	80%	81%	82%
Eventos de tránsito	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Fatal (x100,000 hab.)	98.8%	99.1%	97.8%	99.8%	99.4%	99.4%	99.4%	97.1%	98.1%	98.1%	98.0%	97.1%	109.3%	108.5%	118.5%	97.8%	97.1%	97.2%	97.6%	96.7%	96.7%	97.2%	95.8%
Fallecimientos (x100,000 hab.)	79.5%	69.3%	56.0%	52.4%	52.3%	48.3%	46.1%	46.3%	48.3%	48.3%	48.3%	53.3%	65.7%	68.7%	84.8%	57.6%	53.9%	51.6%	49.2%	49.2%	52.0%	49.1%	47.6%
No fatales (x100,000 hab.)	91.5%	94.8%	89.4%	84.6%	83.3%	74.0%	83.3%	80.1%	83.3%	80.1%	80.1%	84.4%	87.1%	87.1%	84.4%	84.4%	80.4%	79.0%	72.2%	70.3%	65.5%	64.5%	64.8%
Solo datos (x100,000 hab.)	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%	302.8%
Eventos de tránsito	0.62%	0.73%	0.36%	0.33%	0.33%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%	0.43%
Defunciones	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%	3.05%
Defunciones (x100,000 hab.)	0.006%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.005%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%	0.007%
No fatales (x100,000 hab.)	0.070%	0.072%	0.072%	0.080%	0.087%	0.089%	0.092%	0.084%	0.095%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%	0.094%
Solo datos (x100,000 hab.)	0.186%	0.197%	0.216%	0.231%	0.273%	0.300%	0.316%	0.337%	0.376%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%	0.384%
Incidencia total	26	27	29	32	36	39	41	43	43	44	44	44	42	42	38	34	33	33	33	33	29	30	29
Fatal	54	44	48	46	42	43	45	43	41	44	44	44	42	42	38	34	33	33	33	33	29	30	29
Mortalidad	64	52	57	53	50	53	49	48	48	52	58	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
No fatal	70	72	72	80	87	89	92	84	96	94	99	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Solo datos	19	20	25	23	27	30	32	34	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Eventos de tránsito	24	19	19	17	14	13	13	13	11	11	12	13	16	18	17	21	14	13	13	13	12	13	12
Letalidad (x1,000 ET)	154	151	149	146	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151
Letalidad (x1,000,000 hab.)	64	52	57	53	50	53	49	48	48	52	58	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
MTC diaria	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203	1203
MATLS diaria	17	14	15	14	14	14	14	14	14	14	15	17	20	21	20	22	15	14	13	13	12	12	12
Total	0%	4%	12%	21%	39%	59%	58%	62%	63%	68%	67%	61%	46%	48%	48%	27%	24%	21%	20%	20%	12%	13%	11%
Fatal	0%	-18%	-10%	-15%	-2%	-21%	-17%	-21%	-23%	-18%	-7%	-3%	-2%	-8%	-8%	-25%	-31%	-36%	-39%	-40%	-43%	-45%	
No fatal	0%	2%	2%	14%	24%	24%	27%	31%	20%	36%	34%	41%	34%	27%	48%	8%	5%	0%	-6%	-13%	-21%	-26%	
Solo datos	0%	6%	16%	24%	40%	46%	63%	76%	81%	75%	73%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	
Letalidad (x1,000 ET)	100%	78%	80%	60%	56%	52%	45%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	
Letalidad (x1,000,000 hab.)	100%	81%	89%	84%	78%	78%	78%	77%	75%	75%	81%	90%	106%	107%	98%	109%	73%	54%	52%	50%	48%	48%	
Defunciones por ATUS (x100,000 hab.)	118	117	115	115	118	118	117	116	116	117	115	115	129	128	140	115	115	115	115	115	114	115	113
Defunciones por ATUS (x100,000 hab.)	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075	439,075
OR (x100,000 hab.)	1.24%	1.01%	1.11%	1.06%	0.97%	0.98%	1.02%	0.94%	0.92%	0.99%	1.10%	1.10%	1.27%	1.26%	1.14%	1.26%	0.84%	0.76%	0.71%	0.68%	0.66%	0.62%	0.59%
M (x100,000 hab.)	5.274	5.249	5.233	5.228	5.231	5.239	5.255	5.279	5.307	5.385	5.365	5.466	5.559	5.631	5.651	5.682	5.681	5.689	5.705	5.729	5.758	5.813	
η (%)	0%	-19%	-11%	-16%	-22%	-21%	-18%	-24%	-26%	-26%	-20%	-12%	2%	1%	-4%	-32%	-38%	-43%	-45%	-47%	-50%	-53%	
μ (x100,000 hab.)	0.53%	0.52%	0.52%	0.52%	0.52%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	0.53%	
σ (x100,000 hab.)	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	
VAB Total	0.00%	-0.49%	-0.78%	-0.87%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	-0.86%	
VAB ET Total	0.00%	-0.00%	-1.99%	-3.27%	-5.08%	-2.56%	-1.80%	-2.01%	2.56%	5.82%	5.77%	3.48%	5.91%	6.83%	-1.49%	8.68%	-26.64%	-33.03%	-37.50%	-40.08%	-41.73%	-44.44%	
VAB ATUS	0.00%	-18.64%	-11.10%	-16.44%	-22.03%	-21.34%	-17.65%	-23.48%	-24.70%	-18.88%	-9.60%	5.91%	6.83%	-1.49%	8.68%	-26.64%	-33.03%	-37.50%	-40.08%	-41.73%	-44.44%	-47.10%	
Todas	99.5%	99.7%	99.9%	100.1%	100.2%	100.3%	100.3%	100.5%	100.5%	100.5%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%	
Incidence (x10,000 hab.)	0.0%	4.3%	11.8%	20.6%	39.1%	50.1%	57.5%	64.4%	69.9%	67.7%	61.3%	45.9%	43.4%	28.1%	27.5%	24.3%	21.1%	20.2%	17.0%	13.2%	11.2%	11.2%	
Letalidad (x1,000 ET)	0.0%	-22.0%	-20.5%	-30.7%	-44.0%	-47.6%	-47.7%	-52.9%	-53.9%	-51.7%	-46.1%	-34.3%	-26.8%	-31.3%	-15.7%	-4.2%	-4.3%	-4.3%	-4.3%	-4.3%	-4.3%	-4.3%	
Letalidad (x1,000,000 hab.)	0.0%	-18.6%	-11.1%	-16.4%	-22.0%	-21.7%	-17.7%	-23.5%	-24.7%	-18.9%	-9.8%	5.9%	6.8%	-1.5%	8.7%	-26.6%	-33.0%	-37.5%	-40.1%	-41.7%	-44.4%	-47.1%	
Reincidencia ATUS	98.45%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	99.28%	