

01121  
38



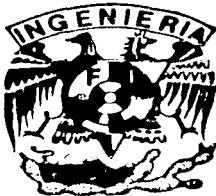
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

LOCALIZACION DE LOS SERVICIOS DE EMERGENCIA EN  
CARRETERAS. CASO ESTUDIO:  
AUTOPISTA MEXICO - QUERETARO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
RAUL ESPINOZA JIMENEZ



DIRECTOR. DR RICARDO ACEVES GARCIA

MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2003

A



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.

En este trabajo se refleja, tal vez de forma muy vaga; pero finalmente ahí está; gran parte de lo que hemos aprendido y vivido juntos... a todos ustedes mis más sinceros agradecimientos por compartir tantos tiempos conmigo.

A Raúl, Elisa y Daniel por su apoyo constante y libre de condiciones.

A mis amigos de toda la carrera que es la vida Arturo, Gerardo, Humberto, Edgar, Gerardo, Fernando, Marcos y Carlos.

A Carolina, Héctor, Nadia, Mireya, Rafael y Sydney.

A Flor, Tania, Luis, David, Erik, Nora y a todos los demás con quienes he compartido momentos hermosos bajo el pretexto de fotografiar el mundo.

A la universidad y a sus verdaderos maestros.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo en internet.

NOMBRE: Raúl Espinoza

Jiménez

FECHA: 23.04.2003

FIRMA: 



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/021/02

Señor  
RAÚL ESPINOZA JIMÉNEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. RICARDO ACEVES GARCIA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS DE EMERGENCIA PARA LA ATENCIÓN DE ACCIDENTES EN CARRETERAS. CASO DE ESTUDIO: MÉXICO-QUERÉTARO"**

- INTRODUCCION
- I. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA IMPORTANCIA DE SU SOLUCION
  - II. ANÁLISIS DE LA CARRETERA MÉXICO-QUERÉTARO, CASO DE ESTUDIO
  - III. TEORÍA DE LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS DE EMERGENCIA
  - IV. ALGORITMO DE SOLUCIÓN Y RESULTADOS
  - V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 31 de enero 2002  
EL DIRECTOR

M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFV/GMP/psfu

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
I. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN .....	5
<i>I.1 La problemática en Cifras</i> .....	5
<i>I.2 Medidas tomadas</i> .....	13
<i>I.3 Tiempo de supervivencia de las víctimas</i> .....	15
II. ANÁLISIS DE LA CARRETERA MÉXICO – QUERÉTARO, CASO DE ESTUDIO .....	19
<i>II.1 Elección del caso de estudio</i> .....	19
<i>II.2 Descripción física de la autopista México – Querétaro</i> .....	22
<i>II.3 Accidentes en la autopista México – Querétaro</i> .....	24
III. TEORÍA DE LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS .....	28
<i>III.1 Motivos para el empleo de la teoría de localización de servicios</i> .....	28
<i>III.2 Breve historia</i> .....	29
<i>III.3 El problema de la localización de servicios</i> .....	30
<i>III.4 Técnicas de solución para problemas de localización</i> .....	35

IV. ALGORITMO DE SOLUCIÓN Y RESULTADOS .....	39
<i>IV.1 Particularidades del problema de localización de los EMS para carreteras .....</i>	<i>39</i>
<i>IV. 2 Presentación del algoritmo de solución .....</i>	<i>43</i>
<i>IV. 3 Ejemplo de aplicación del algoritmo .....</i>	<i>62</i>
<i>IV.4 Resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo a la autopista México – Querétaro .....</i>	<i>78</i>
<i>IV. 5 Generalización del algoritmo .....</i>	<i>80</i>
CONCLUSIONES .....	81
ANEXO 1 .....	87
ANEXO 2 .....	90
ANEXO 3 .....	93

## RESUMEN

En el afán de ubicar de forma óptima los Servicios Médicos de Emergencia, es decir minimizando el número de servidores y por ende el costo del sistema en conjunto; con un tiempo que debiera ser a lo más igual a un tiempo predeterminado como el adecuado para evitar la mayor cantidad de decesos posible en las carreteras según estudios médicos y estadísticos, así como con la garantía de servicio a la totalidad de la carretera, esto es considerando la posibilidad de la ocurrencia de un accidente vehicular mortal en potencia sobre cualquier punto de la vía como restricciones; se hizo una minuciosa revisión de los problemas resueltos hasta la fecha mediante la Teoría de Localización sin encontrar procedimiento adecuado alguno al caso particular de la Localización de los Servicios Médicos de Emergencia.

Así, con fundamento en los preceptos de la Ingeniería de Sistemas y en particular en aquellos de la Teoría de Localización, se diseñó un algoritmo capaz de resolver dicho Problema de Localización de forma sencilla, práctica y adecuada para cualquier carretera.

## INTRODUCCIÓN

### Planteamiento del problema

Se ha observado que en nuestro país una de las principales causas de mortandad son los accidentes, y dentro de ellos destacan los automovilísticos. En estadísticas recientes resulta que en México muere una persona a causa de un accidente cada 15 minutos; siendo de ellos el 40.8% por tránsito de vehículo automotor. Solamente en 1999, la estadística indica un saldo de 5,113 personas fallecidas, producto de 60,512 accidentes vehiculares en las carreteras de nuestro país; igualmente las pérdidas materiales para ese año se estiman en alrededor de 150 millones de pesos.

Sin embargo, las estadísticas que presenta el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), son aún más preocupantes respecto de los accidentes en las carreteras de Latinoamérica, pues estiman alrededor de 100,000 muertes y 1,200,000 lesionados en 1998, con pérdidas materiales ascendentes a 30,000 millones de dólares, lo cual equivale a más o menos el 1% del PIB de los países de la región, por lo cual han fomentado la puesta en marcha de programas de prevención y de atención a accidentes vehiculares, proponiéndose la meta de salvar unas 500,000 vidas en los próximos 20 años.

En estudios de otro tipo, llevados a cabo en el Reino Unido se ha investigado acerca del tiempo que sobreviven las víctimas luego de un accidente de vehicular. Los resultados indican que de las personas que mueren en accidentes de tránsito, alrededor del 50% lo hace en los primeros 15 minutos debido a lesiones cerebrales, lesiones al corazón o por sangrados. Un 35% de los accidentados mueren en las siguientes 2 horas por lesiones en la cabeza o en el tórax y el 15% restante fallece en alguno de los 30 días consecuentes por disfunción de algún órgano interno. Los resultados de los estudios hechos en México son similares, pues indican que de entre las víctimas el 55% perece en el lugar del accidente, 30% lo hacen en el hospital en las primeras horas luego de su llegada y el 15% pierde la vida en el hospital en una o dos semanas (Trunkay, 1987)

De estudios (Moylean et al, 1988), luego de un accidente vehicular, se presentan 4



# **TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

momentos que son los que marcarán la diferencia entre la vida y la muerte de los accidentados. El primero es el tiempo que transcurre entre el accidente y el aviso a los servicios de emergencia médica; el segundo es el tiempo de respuesta de dichos servicios hasta llegar al lugar del siniestro; el tercer momento considera el tiempo de traslado de las personas hacia un hospital y por último, el tiempo que el paciente permanece en hospitalización.

Los estimados del número de vidas que potencialmente podrían salvarse si se mejoran los servicios de emergencia médica varían desde el 1% en Suecia al 11% en regiones de Australia y hasta el 23% en algunos lugares de los Estados Unidos de Norteamérica. Estas estadísticas son válidas para países desarrollados en los cuales existen servicios de emergencia médicos y hospitalarios bien organizados por sí mismos y entre sí. En ellos las potenciales mejoras se harían en la tercera o cuarta etapa, pues los estudios muestran que de darse en las primeras dos etapas la mejoría, se podrían salvar a poco menos del 5% de las personas accidentadas. En los países menos desarrollados la situación es diferente, pues los congestionamientos viales y la falta de infraestructura vial en las ciudades hacen que el tiempo de la tercera etapa sea difícil de mejorar y el poco presupuesto con que cuentan las instituciones de salud hacen suponer que difícilmente se mejorará en la cuarta etapa. Por ello, las mejoras en los países en vías de desarrollo deberán suceder en las primeras dos etapas, es decir, en lo que respecta al tiempo de respuesta de los servicios médicos de emergencia y en cuanto a control de hemorragias.

Por tales motivos se plantea la necesidad de un mayor número de unidades médicas de emergencia que atiendan a las carreteras de nuestro país, así como de que la ubicación de estos servicios a lo largo de la carretera sea tal, que el tiempo de respuesta a los lugares de los accidentes sea minimizado.

De entre los distintos tipos de carreteras, el que ofrece mayor oposición a la reducción de los tiempos de respuesta de los servicios de atención a accidentes, es aquel en el que los vehículos de rescate pueden transitar en un solo sentido para atender un accidente que probablemente ocurrió en el carril con el sentido contrario, por ello se plantea además la necesidad de hacer el presente estudio en una vía de tal tipo, es decir en una de las clasificadas por la SCT como de tipo A de cuerpos separados, condiciones que se presentan en la autopista

México – Querétaro.

## Objetivo

El objetivo general de la presente tesis es presentar una alternativa de solución para reducir el número de decesos en accidentes carreteros, mediante el desarrollo de una metodología que permita resolver el problema de determinar el número y la localización de los servicios médicos de emergencia en carreteras, a partir del análisis de un caso particular: la autopista México – Querétaro, utilizando modelos matemáticos, las herramientas computacionales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN

### 1.1 *La problemática en cifras*

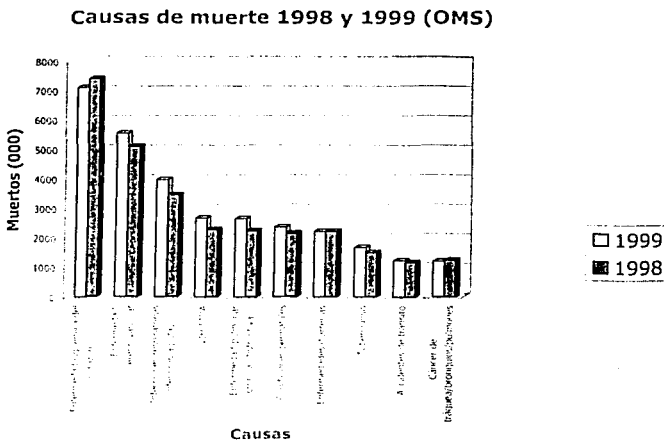
Uno de los problemas más preocupantes en el sector Transporte para la mayoría de las naciones del mundo, es la gran mortandad en las carreteras generada por accidentes vehiculares. Es evidente que este problema inquieta a las administraciones de casi todas las naciones, puesto que en la mayoría de los países se manejan Instituciones públicas y privadas, con programas en materia de seguridad en carreteras e incluso existen Instituciones Internacionales con la misma vocación. También es frecuente encontrarse con una gran cantidad de reportes, artículos así como libros que año con año se publican por científicos de todo el mundo a este respecto.

Las causas de esa preocupación son evidentes, pues cada año las estadísticas que se refieren a la cantidad de accidentes en las carreteras y a sus consecuencias (pérdidas materiales, lesionados, víctimas fatales) son alarmantes. En ocasiones pudiera pensarse que su tendencia es de disminución debido a que los porcentajes de muertes a causa de accidentes así lo indican, pero esta disminución en porcentaje, más bien es consecuencia del incremento del número de muertes por otras causas como el SIDA o la violencia. La realidad es que los totales en el renglón de muertes a causa de los accidentes viales es mayor cada año. Esto se puede observar con claridad en la figura 1.1.

En las tablas del anexo 1 se presentan las estadísticas más recientemente publicadas por la Organización Mundial de la Salud. La primera de ellas se refiere al número de personas que presentan un cierto padecimiento que es causa de incapacidad y la segunda de ellas, al número de decesos que ocurren a partir de cada uno de los padecimientos del cuadro antes mencionado. Estos datos corresponden al año de 1999.

Si los datos a los que anteriormente se hace referencia se les ordena de manera decreciente, como en las tablas 1.1 y 1.2, se observa que los accidentes de tránsito fueron en 1999 la novena causa de muerte en el mundo y la séptima en el continente Americano, razón por la cual adquieren el grado de importancia tan alto que ostentan. Se observa además que los

decesos por accidentes en vehículo automotor se encuentran por encima de los causados por enfermedades como la diabetes mellitus y de varios tipos de cáncer. En México, los accidentes ocupan el cuarto lugar de entre las causas de muerte y la tercera parte de ellos corresponde a los accidentes vehiculares, según las estadísticas de la Secretaría de Salud que se presentan en la tabla 1.3.



**FIGURA 1.1.** Total de muertes según causas.  
Fuente: OMS 1998 - 1999.

En las mismas tablas 1.1 y 1.2 se observa que el 2.2% de las muertes en todo el mundo y el 2.6% en el continente Americano son a causa de accidentes de tránsito, con cifras que ascienden a poco más de 1,200,000 muertos en el mundo y a casi 150,000 decesos en América. México, con sus casi 12,000 decesos por accidentes viales en 1999, presenta la misma tasa de 2.6% del Continente Americano, superior a la media mundial.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Causa de muerte	Lugar	% de las muertes	total de muertes [miles]
Enfermedad isquémica cardíaca	1	12.7	7 089
Enfermedad cerebrovascular	2	9.9	5 544
Infecciones respiratorias agudas bajas	3	7.1	3 963
VIIH/SIDA	4	4.8	2 673
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	5	4.8	2 660
Condiciones perinatales	6	4.2	2 356
Enfermedades diarreicas	7	4.0	2 213
Tuberculosis	8	3.0	1 669
<b>Accidentes de tránsito</b>	<b>9</b>	<b>2.2</b>	<b>1 230</b>
Cáncer de tráquea/bronquios/pulmones	10	2.1	1 193
Otras	-	45.3	25 374

**TABLA 1.1.** Principales causas de muerte en el mundo.

Fuente: OMS 1999.

Causa de muerte	Lugar	% de las muertes	total de muertes [miles]
Enfermedad isquémica cardíaca	1	15.6	886
Enfermedad cerebrovascular	2	7.3	417
Infecciones respiratorias agudas bajas	3	5.2	295
Cáncer de tráquea/bronquios/pulmones	4	4.0	226
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	5	2.8	161
Condiciones perinatales	6	2.7	153
<b>Accidentes de tránsito</b>	<b>7</b>	<b>2.6</b>	<b>148</b>
Homicidio y violencia	8	2.5	142
Cirrosis hepática	9	2.1	120
Cáncer de colon/recto	10	1.8	102
Otras	-	53.4	3 036

**TABLA 1.2.** Principales causas de muerte en el continente americano.

Fuente: OMS 1999.

En estadísticas de los países desarrollados se observa que los accidentes automovilísticos son la primera causa de muerte entre las personas menores de 44 años de edad, es decir los más jóvenes. En México, la tendencia es similar, pues los grupos más afectados son los de personas entre los 5 y los 54 años de edad. Para cada uno de dichos grupos, normalmente son los accidentes la primera o segunda causa de muerte, con cifras muy cercanas a las de los muertos por violencia y superiores a la tasa media de muertes por accidentes vehiculares. El grupo en particular más afectado es el de los jóvenes de entre 15 y 24 años, pues del total de muertos de ese grupo, casi el 15% pierde la vida en accidentes de tránsito, como se observa en la tabla 1.4 y en la figura 1.2.

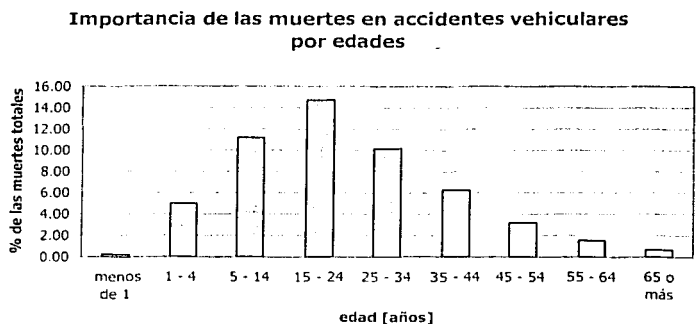
No. De Orden	C a u s a	Defunciones
	Total	443,950
<b>1</b>	Enfermedades del corazón	69,278
	- Enfermedades isquémicas del corazón	44,070
<b>2</b>	Tumores malignos	53,662
<b>3</b>	Diabetes mellitus	45,632
<b>4</b>	Accidentes	35,690
	- Accidentes de tráfico de vehículos de motor	11,659
<b>5</b>	Enfermedades del hígado	27,040
	- Enfermedad alcohólica del hígado	13,417
<b>6</b>	Enfermedades cerebrovasculares	25,836
<b>7</b>	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	19,268
	- Dificultad respiratoria del recién nacido y otros trastornos respiratorios originados en el período perinatal	10,042
<b>8</b>	Influenza y Neumonía	14,068
<b>9</b>	Agresiones (homicidio)	12,249
<b>10</b>	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	11,319
<b>11</b>	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	9,776
<b>12</b>	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	9,714
<b>13</b>	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	7,840
<b>14</b>	Insuficiencia renal	7,807
<b>15</b>	Enfermedades infecciosas intestinales	5,622
<b>16</b>	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana (SIDA)	4,204
<b>17</b>	Anemia	3,581
<b>18</b>	Lesiones autoinfligidas intencionalmente (suicidio)	3,339
<b>19</b>	Tuberculosis pulmonar	3,229
<b>20</b>	Septicemia	3,085
	Paro cardíaco	0
	Síntomas, signos y hallazgos anormales clínicos y de laboratorio no clasificados en otra parte	9,474
	Las demás causas	62,237

**TABLA 1.3.** Causas de mortalidad general en los Estados Unidos Mexicanos.

**Fuente:** Secretaría de Salud 1999.

Edad [años]	Total muertes	Muertes por Accidentes Vehiculares	%
Menos de 1	40283	97	0.24
1 - 4	7274	388	4.99
5 - 14	7483	837	11.19
15 - 24	18191	2672	14.72
25 - 34	23670	2404	10.16
35 - 44	29783	1865	6.26
45 - 54	39434	1269	3.22
55 - 64	56027	875	1.56
65 o más	218994	1506.5	0.69

**TABLA 1.4.** Porcentaje de muertes en accidentes vehiculares en México, por grupos de edad.  
Fuente: Secretaría de Salud 1999.



**FIGURA 1.2.** Porcentaje de muertes en accidentes vehiculares en México, por grupos de edad.  
Fuente: Secretaría de Salud 1999.

Otro parámetro para evaluar la situación de nuestro país, es la estadística que maneja Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) y que es generada por la Policía Federal Preventiva (PFP) en las carreteras de México a través de la Policía Federal de Caminos y Puertos (PFCyP). Estos datos son presentados en la tabla 1.5 y corresponden al año 2000. En ellos se observa un informe detallado de los accidentes para cada mes de ese año, que incluye el tipo de accidente, la causa probable del mismo, el número de lesionados y/o muertos y un estimado de las pérdidas materiales, en las carreteras vigiladas por la PFCyP.



MESES	NO. DE REPORTE DE ACCIDENTES	MUERTOS			HERIDOS			DAÑOS MATERIALES	
		CONDUCTORES	PASAJEROS	PEATONES	CONDUCTORES	PASAJEROS	PEATONES	VEHICULOS	AL CAMINO
ENERO	4 703	188	144	83	1 029	1 705	104	\$140.245.390 00	442
FEBRERO	4 581	184	162	80	985	1 528	86	\$135.846.230 00	479
MARZO	4 929	192	180	80	1 110	1 990	113	\$144.457.750 00	615
ABRIL	4 758	179	214	62	1 107	2 289	92	\$138.348.701 00	511
MAYO	4 849	159	155	69	1 079	1 716	91	\$149.171.700 00	612
JUNIO	5 190	171	132	53	1 074	1 915	83	\$157.234.250 00	600
1er. SEMESTRE	29 115	1 192	987	433	6 384	11 143	569	\$665.304.021 00	3 259
JULIO	5 278	177	199	55	1 251	2 192	86	\$154.339.211 50	583
AGOSTO	5 442	150	168	66	1 151	2 056	92	\$165.153.155 00	653
SEPTIEMBRE	4 952	148	142	61	1 007	1 594	79	\$138.684.140 00	496
OCTUBRE	4 250	123	118	57	878	1 711	94	\$140.349.021 00	496
NOVIEMBRE	4 134	141	149	53	865	1 480	61	\$125.441.840 00	417
DICIEMBRE	4 530	140	143	71	1 064	1 763	57	\$135.533.000 00	443
2do. SEMESTRE	23 290	918	909	363	6 216	10 816	469	\$860.700.367 50	3 088
TOTAL	57 315	2 320	1 896	796	12 600	21 959	1 038	\$1 726 004 388 50	6 347

TOTAL DE LESIONADOS	35,597
TOTAL DE MUERTOS	4,712

TABLA 1.5. Accidentes en las carreteras a cargo de la PFCyP.  
Fuente: CAPUFE 2000.

TERCIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

País	Periodo	Defunciones	Total	Enfermedades infecciosas intestinales	Tumores malignos	Diabetes mellitus	Enfermedades del aparato circulatorio	Enfermedades del aparato respiratorio	Enfermedades del aparato digestivo	Accidentes y efectos adversos	Suicidios y lesiones autoinfligidas	Resto de causas
Alemania	1995	884 596	100	0.72	24.07	2.64	48.54	6.16	4.73	2.89	1.46	8.99
Austria	1994	126 980	100	0.88	26.62	2.17	43.26	7.89	3.65	3.54	1.8	10.81
Austria	1995	81 121	100	0.81	27.91	2.19	53.63	4.31	3.99	3.28	2.2	6.32
Canadá	1995	216 733	100	0.65	27.46	2.81	37.64	6	3.67	4.19	1.63	12.88
Corea del Sur	1995	239 110	100	0.1	21.04	3.27	7.18	4.63	7.45	1.34	7.03	52.93
Corea del Sur	1994	15 445	100	0.4	20.76	1.34	27.74	11.88	6.9	6.1	1.08	20.29
Hong Kong	1995	35 656	100	0.41	31.75	1.67	27.81	19.65	4.35	1.44	0.94	7.01
Japón	1994	324 242	100	0.27	16.1	1.65	28.18	9.21	5.34	1.72	0.84	12.64
Estados Unidos de América	1994	2 019 194	100	1.4	23.44	2.41	41.46	3.35	3.4	4.07	1.97	13
Francia	1994	1 026 811	100	1.48	13.42	3.65	52.6	6.94	0.81	8.72	2.77	13.39
Francia	1994	1 126 885	100	1.56	27.27	1.74	52.29	7.31	4.81	6.72	2.32	17.69
Francia	1995	130 758	100	0.92	27.99	3.88	51.29	5.76	2.93	4.63	0.37	12.66
Francia	1995	135 475	100	0.99	28.89	2.2	56.4	9.32	3.71	2.81	1.11	14.95
Hungría	1995	145 417	100	0.57	22.65	1.29	53.74	4.43	8.13	6.22	2.32	4.65
Italia	1995	35 348	100	1.68	27.78	3.21	42.6	4.16	3.54	9.78	1.02	17.24
Italia	1993	552 316	100	0.4	27.78	3.25	43.76	5.9	5.15	4.63	0.85	9.58
México	1998	444 665	100	4.72	12.42	9.41	22.43	9.34	9.38	8.78	0.75	22.78
Noruega	1994	44 675	100	0.93	23.45	1.19	44.29	10.39	2.93	3.76	1.2	12.16
Reino Unido	1995	346 064	100	0.5	28.73	1.7	50.43	3.43	3.1	5.19	1.42	13.81
Reino Unido	1995	645 453	100	0.59	24.46	1.64	42.93	15.83	3.44	1.86	1.67	6.13
Suecia	1995	79 747	100	0.74	27.74	3.74	35.71	18.71	2.13	1.11	2.16	8.75
Suecia	1994	93 647	100	0.95	22.11	1.7	49.64	7.84	2.16	2.59	1.44	11.31
Suecia	1994	92 620	100	0.44	9.16	1.34	11.47	6.8	3.46	36.38	0.76	33.04

Los datos corresponden a la Alemania Unificada

FUENTE: WHO World Health Statistics Annual, 1995

Para México: INEGI Dirección General de Estadística Dirección de Estadísticas Demográficas y Sociales.

TABLA 1.6. Principales causas de muerte para varios países

Fuente: INEGI 1998

En otra comparación que hace el INEGI, presentada en la tabla 1.6, se puede ver que la tasa de mortandad a causa de accidentes, es superior a la que se presenta no sólo en el promedio mundial, sino a la que corresponde a la mayoría de las demás naciones tomadas por separado. En las estadísticas oficiales del transporte en Norteamérica, emitidas por los respectivos Organismos Gubernamentales de México, Estados Unidos y Canadá, se opera con las estadísticas para determinar la cantidad de muertes en relación con el total de accidentes de tránsito que ocurren, se observa que México está en niveles altos de mortandad, pues se encuentra que el número de muertes en accidentes de tránsito es de alrededor de 7.5 por cada 10,000 vehículos que circulan en el país, mientras que en los países desarrollados la estadística indica 2.0 muertes por cada 10,000 vehículos, como se indica en la tabla 1.7 y se aclara en la figura 1.3.

De todos los accidentes vehiculares que acontecen en México, poco más de la mitad se presentan en la red carretera del país, de tal manera, se observa un total de 4,712 muertos en 57,315 accidentes en las carreteras, lo cual representa que aproximadamente el 10% de los accidentes viales que ocurren en las carreteras de México, tiene consecuencias fatales.

	Canadá			México			Estados Unidos		
	1990	1995	1996	1990	1995	1996	1990	1995	1996
Total de muertos	3,963	3,351	3,091	10,201	9,043	9,305	41,599	41,817	42,065
Total de heridos	262,680	241,935	230,890	93,325	121,638	115,274	3,231,000	3,465,000	3,511,000
Total de vehículos automotores (millones)	17.0	17.0	17.2	10.2	12.0	12.4	193.1	205.4	210.2
<b>Índices por cada 10,000 vehículos automotores</b>									
Muertos	2.3	2.0	1.8	10.0	7.5	7.5	2.3	2.0	2.0
Heridos	155	142	134	91	101	93	167	169	167

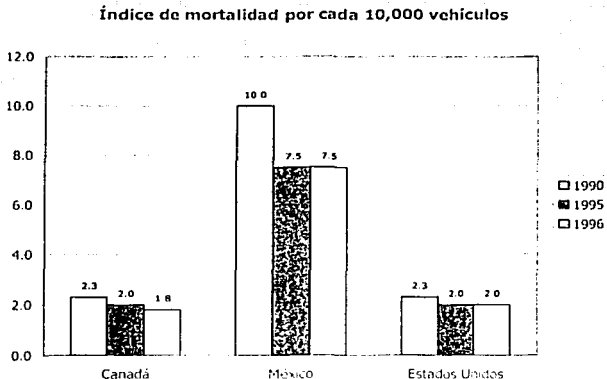
**TABLA 1.7.** Estadísticas de accidentes por tránsito de vehículos automotores

Fuente: México: INEGI, 1996

Canadá: Minister for Public Works and Government Services, 1997

Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 1999

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**FIGURA 1.3.** Índice de mortalidad en accidentes vehiculares por cada 10,000 vehículos.  
**Fuente:** México: INEGI, 1996  
 Canadá: Minister for Public Works and Government Services, 1997  
 Estados Unidos: U.S. Department of Transportation, 1999

## 1.2 Medidas tomadas

Los párrafos anteriores describen en buena medida la situación de la seguridad en las carreteras del mundo así como de México y la atención al respecto es de primordial importancia en nuestro país, tal razón condujo al Gobierno Federal a la creación de un Organismo dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), el Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPREA), el cual, si bien es un esfuerzo interesante además de necesario, debe reconocerse que se trata de un Órgano muy reciente y que no ha contado con el tiempo suficiente, para reflejar resultados importantes en las estadísticas que año con año respecto de los accidentes vehiculares son publicadas, además, difícilmente se consiguen publicaciones de dicho organismo.

Resultados similares se han presentado en otros países, pues si bien, algunas medidas como el uso del cinturón de seguridad o el uso de casco en motociclistas han probado que son efectivas, son difícilmente aceptadas por la sociedad [1]. Irónicamente, las personas para las

cuales el riesgo es mayor son las más renuentes al cambio de actitud. Esto ha forzado a los gobiernos a establecer estas medidas mediante las leyes, lo cual ante la opinión pública resulta en un acto impositivo con las correspondientes consecuencias de carácter social.

Los programas de educación para la seguridad que se han implementado en países del primer mundo han demostrado ser, aunque políticamente aceptables, costosos y muy poco efectivos. Por ejemplo, en un programa de 78 millones de dólares, que se puso en marcha en varias comunidades de los Estados Unidos de Norteamérica, con el objeto de reducir la tasa de mortandad en accidentes automovilísticos relacionados con el consumo de alcohol, fue posible observar que dicho parámetro no se redujo para las poblaciones en cuestión [2].

Al ser complicada la prevención de los accidentes viales, se observa que las tasas de mortandad en todo el mundo decrecen con un ritmo muy lento y esa disminución bien se puede atribuir meramente al avance de dos campos: al de la Ingeniería en los vehículos, los cuales continuamente reciben mejoras en su diseño logrando ser un poco más seguros, y al avance de la ciencia médica que evoluciona para poder salvar cada vez más vidas.

La rama de la medicina que se especializa en la atención de las víctimas de los accidentes viales es la de Urgencias Médicas y dentro de ella se distinguen como los encargados del primer contacto médico con los accidentados los Servicios Médicos de Emergencia (EMS por sus siglas en inglés). En los EMS es de primordial importancia la parte médica por la razón anteriormente mencionada, sin embargo, una parte muy importante del éxito de estos Servicios recae en la logística con que se desenvuelven.

Resulta claro que el tiempo, cuando se trata de salvar vidas es de suma importancia y una de las funciones de la Ingeniería de Sistemas, a través de la Logística es ayudar a que los tiempos en una cadena de operaciones resulten mínimos y es aquí en donde se presenta el vínculo entre la Ingeniería de Sistemas y los EMS, el cual es evidente cuando se observa que la mayoría de las acciones que realizan los integrantes de los EMS, tanto en los entrenamientos como al actuar en un accidente real, van enfocadas a ayudar al paciente lo mejor que se pueda con cada actividad y en el menor tiempo.

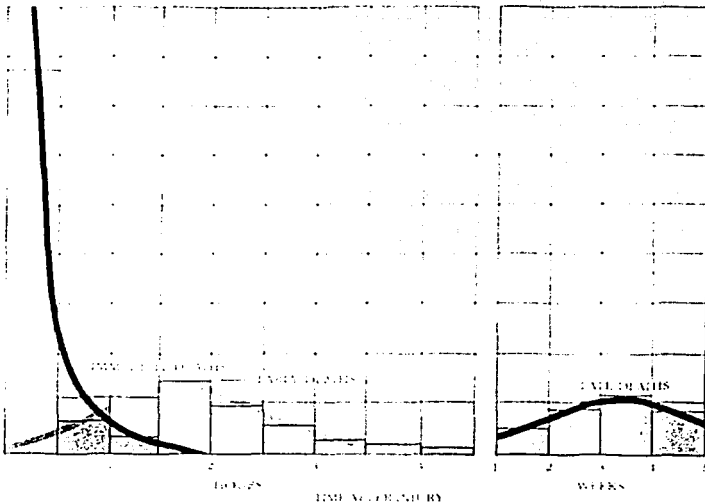
De ahí el tema del presente trabajo, es decir una de las múltiples actividades que realizan los EMS, la de acudir al sitio del accidente en el menor tiempo posible, sin que esto sea excesivamente costoso para quienes financian el servicio.

### *1.3 Tiempo de supervivencia de las víctimas*

Al tratar de reducir los tiempos de las actividades que integran un proceso cualquiera, lo primero es saber en función de qué están esos tiempos y para este caso particular de los accidentes en vehículos automotores, los tiempos del proceso de rescate a las víctimas están en función de lo que tardan las personas en fallecer luego del accidente, y más específicamente, para la actividad de respuesta de los EMS al lugar del percance, el tiempo que se toma como parámetro es el tiempo en el cual los individuos mueren sin que se les haya brindado ningún tipo de atención médica.

Trunkey y otros investigadores [3] demostraron que las muertes a causa de traumatismos siguen una distribución trimodal de probabilidades, misma que se presenta en la figura 1.4. El primer grupo cuenta al 50% de las víctimas y lo integran quienes fallecen en el sitio del incidente ya sea instantáneamente o en cuestión de minutos; otro 30% de las personas perece luego de 1 o 2 horas a partir del momento del impacto, por lo que los especialistas en medicina de emergencia han denominado como la "hora de oro" a esa primer hora luego del accidente, y por ello entienden a una hora como el tiempo límite que se tiene para poner totalmente a salvo la vida del paciente. El último de los grupos en la citada distribución trimodal es el que comprende a quienes fallecen luego de una o dos semanas y en esta situación se encuentran alrededor del 20% de quienes mueren a causa de accidentes por tránsito de vehículo automotor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIGURA 1.4.** Distribución trimodal de las muertes a causa de accidentes.  
**Fuente:** Trunkey, 1983

Las causas que conducen a la muerte a los individuos del primer grupo son principalmente sangrados de la aorta o de cualquiera de las arterias mayores y lesiones mayores al cerebro o a la médula espinal. Muchos de estos pacientes son en realidad insalvables por la gravedad de las lesiones. En el segundo grupo las causas del deceso son las lesiones abdominales, generalmente del hígado, de los riñones, o traqueopulmonares además de las fracturas múltiples con pérdida importante de sangre. Si dichas lesiones se identifican y se tratan rápida y adecuadamente, los pacientes tienen una gran oportunidad de conservar la vida.

Las lesiones torácicas son las que propician la muerte de los fallecidos luego de transcurridos varios días desde el incidente. Generalmente son lesiones difíciles de detectar y desafortunadamente, no reparables.

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

De tal manera que, con el fin de salvar a algunas de las potenciales víctimas del primer grupo y a la gran mayoría de los pacientes del segundo caso, los expertos en diseño de EMS recomiendan los siguientes tiempos de respuesta para los equipos que brindan los primeros auxilios:

MEDIO	ACCIDENTE MÓRTAL EN POTENCIA	ACCIDENTE NO MÓRTAL EN POTENCIA
Urbano	90% dentro de 8 minutos	90% dentro de 12 minutos
Suburbano	90% dentro de 12 minutos	90% dentro de 15 minutos
Rural	90% dentro de 15 minutos	90% dentro de 20 minutos
Bosque o Selva	90% dentro de 60 minutos	90% dentro de 60 minutos

**TABLA 1.8.** Tiempos de respuesta que se recomiendan para el diseño de EMS.

Fuente: [4].

En el caso particular de este trabajo se trata de accidentes en carreteras y aún cuando en ocasiones una vía de esta naturaleza pase por zonas urbanas o por bosques o selvas en los cuales no hay pobladores, el caso general es el de que las carreteras se ubican sobre el medio rural y el tipo de accidentes al que se pretende dar respuesta es a los que son potencialmente de muerte, por lo tanto, el tiempo de respuesta con el que deben cumplir al menos el 90% de los equipos médicos de emergencia de los que en el presente trabajo se trate, es de 15 minutos.

## REFERENCIAS

[1] Kellerman, A.L. y Hutson H.R., Injury Control. En Schwartz, George R. et al, eds., Principles and Practice of Emergency Medicine, 4th edition, Baltimore, Williams & Wilkins, 1999.

[2] Zador, P., Statistical Evaluation of the Effectiveness of Alcohol Safety Action Projects – Part I. En Schwartz, George R. et al, eds., Principles and Practice of Emergency Medicine, 4th edition, Baltimore, Williams & Wilkins, 1999.

[3] Trunkey, D.D., Trauma, *Scientific American*, 249 (1983), 28-35.



[4] Stout, Jack L., EMS System Design. En Schwartz, George R. et al, eds., Principles and Practice of Emergency Medicine, 4a edition, Baltimore, Williams & Wilkins, 1999.

## II. ANÁLISIS DE LA CARRETERA MÉXICO – QUERÉTARO, CASO DE ESTUDIO.

### *II.1 Elección del caso de estudio*

Con la finalidad de que la solución al problema de la localización de los servicios de emergencia en carreteras, que en esta tesis se presenta, pueda visualizarse con mayor facilidad, se ha planteado el desarrollo de un caso de estudio.

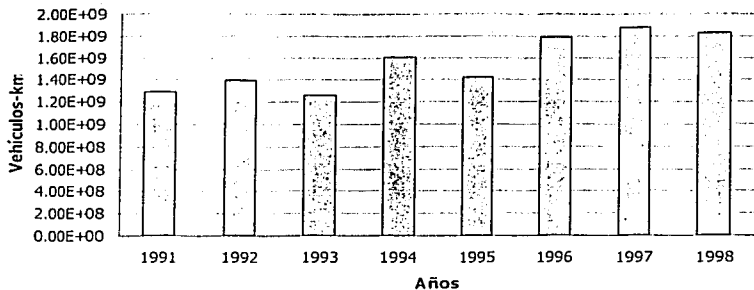
En el presente estudio, se consideró que la carretera a elegir como caso de estudio, debería ser tal que sus características determinasen las condiciones más desfavorables para resolver el problema de la localización de los servicios de emergencia en las carreteras, esto con el propósito de que, al presentarse la solución para un caso complicado, la aplicación de la metodología en otros casos resulte muy sencilla.

La carretera que se eligió como caso de estudio es la autopista México – Querétaro (MEX 57 y 57 - D), y dentro de ella, el tramo de 169 Km de longitud, que se miden desde la caseta de cobro en Tepotzotlán, Edo. de México en el Km 43, hasta la intersección con el Bulevar Bernardo Quintana, en la ciudad de Querétaro de Arteaga, Qro. a la altura del Km 212.

En algunos de sus tramos, es la autopista México – Querétaro una carretera con cuerpos separados, es decir, que los vehículos que circulan en sentidos diferentes lo hacen sobre distintos terraplenes de la vialidad. Se buscaba esto, pues es más complicado para los Servicios Médicos de Emergencia (EMS) atender un accidente en una vía que tiene división central, y más aún, cuerpos separados, pues en ocasiones, para acceder al sitio en el que deben practicar el rescate, deben recorrer dos veces el mismo tramo, sólo que en distintos sentidos.

Al ser esta autopista, la principal vía de comunicación terrestre que enlaza a la capital del país con el norte de la República Mexicana, se trata de una ruta con alto volumen de tránsito. Se tiene que en 1998, según datos de la SCT circularon casi 1900 millones de vehículos-Km sobre esta autopista, como se observa en la figura 2.1.

### Volumen de tránsito en Vehículos - km (1991 - 1998)



**FIGURA 2.1.** Total de vehículos-km (1991 - 1998) en la Autopista México - Querétaro  
Fuente: IMT, 1999

Los aforos de la SCT del año 2000, en las casetas de Tepotzotlán y Palmillas, indican 37499 y 25872 vehículos como tránsito diario promedio anual (TDPA) y pocos son los tramos de autopista que son más transitados en nuestro país. Como ejemplos, los tramos de autopista México - Pachuca y México - Tizayuca, con TDPA de 44681 y 29558 vehículos respectivamente en las casetas de San Cristóbal Ecatepec y Tizayuca, como se presenta en la tabla 2.1. Otros tramos de autopista que también son más transitados que la autopista México - Querétaro, son los que cruzan por zonas aledañas a las grandes urbes de la República Mexicana (México, Guadalajara, Monterrey, Puebla, Tijuana y Toluca). El hecho de tener una carretera con un gran volumen de tránsito hace más difícil la solución del problema planteado, en tanto que la velocidad con que pueden viajar los EMS es menor y el número de accidentes a atender es mayor.

En la tabla 2.2, que presenta los aforos en varios puntos de la autopista México - Querétaro, se observa que el número de vehículos que circulan en ambos sentidos de la carretera es muy similar, con diferencia máxima de 880 vehículos entre ambos sentidos a la altura del entronque con la carretera MEX 31, en Jorobas, Edo. De Méx. Esto simplifica en cierta medida los procedimientos, sin embargo, se intentó buscar una carretera que tuviera diferencia

considerable en ese particular de sus aforos, pero las autopistas para las que ello se cumple, no presentan las complejidades anteriormente citadas respecto del trazo geométrico, además de ser vías menos transitadas, como se puede ver en la tabla 2.3 que presenta los aforos para otras autopistas de nuestro país.

	CASETA	CARRETERA	CLAVE	TDPA
1	San Cristóbal Ecatepec	México - Pachuca	MEX 130 - D	44681
2	Tepotzotlán	México - Querétaro	MEX 57 - D	37499
3	Tizayuca	México - Tizayuca	MEX 130 - D	29558
4	San Martín Texmelucan	México - Puebla	MEX 150 - D	26410
5	Palmillas	México - Querétaro	MEX 57 - D	25872
6	La Venta	México - La Marquesa	MEX 15 - D	25765
7	San Marcos	México - Puebla	MEX 150 - D	24220
8	Tlalpan	México - Cuernavaca	MEX 95 - D	22906
9	Querétaro	Querétaro - Celaya	MEX 45 - D	18791
10	Amozoc	Puebla - Acatzingo	MEX 150 - D	15725
11	Salamanca	Celaya - Irapuato	MEX 45 - D	12887

TABLA 2.1. Aforos en las casetas de las principales autopistas de México.

Fuente: SCT, 2001

LUGAR	ESTACION			
	KM	TE	SC	TDPA
MÉXICO	0.00			
LIM. EDOS. TERM. D.F. PPIA. MEX.	11.30			
CASETA DE COBRO "TEPOTZOTLAN"	43.01	3	1	18840
CASETA DE COBRO "TEPOTZOTLAN"	43.01	3	2	18840
ENT. JOROBAS	56.18	3	1	18320
ENT. JOROBAS	56.18	3	2	17440
LIM. EDOS. TERM. MEX. PPIA. HGO.	60.00			
T. DFR. TEPEJI DEL RÍO	69.36	1	1	17240
T. DER. TEPEJI DEL RÍO	69.36	1	2	17185
T. DÉP. TEPEJI DEL RÍO	69.36	3	1	15780
T. DÉP. TEPEJI DEL RÍO	69.36	3	2	15210
T. 12Q. JILOTEPEC	83.75	1	1	12947
T. 12Q. JILOTEPEC	83.75	1	2	12841
T. 12Q. JILOTEPEC	83.75	3	1	12148
T. 12Q. JILOTEPEC	83.75	3	2	12137
LIM. EDOS. TERM. HGO. PPIA. MEX.	86.00			
T. C. JILOTEPEC - MARAVILLAS	107.00	1	1	14615
T. C. JILOTEPEC - MARAVILLAS	107.00	1	2	14570
T. C. JILOTEPEC - MARAVILLAS	107.00	3	1	14207
T. C. JILOTEPEC - MARAVILLAS	107.00	3	2	14232
T. 12Q. ACULCO	125.00	1	1	13860
T. 12Q. ACULCO	125.00	1	2	14025

T. IZQ. ACULCO	125.00	3	1	14326
T. IZQ. ACULCO	125.00	3	2	14333
LIM. EDOS. TERM. MEX. PPIA. QRO.	145.81			
CASETA DE COBRO "PALMILLAS"	147.92	1	1	13390
CASETA DE COBRO "PALMILLAS"	147.92	1	2	13280
T. IZQ. TOLUCA	148.50	1	1	14081
T. IZQ. TOLUCA	148.50	1	2	13925
T. IZQ. TOLUCA	148.50	3	1	16221
T. IZQ. TOLUCA	148.50	3	2	16110
T. DER. PONIENTE SAN JUAN DEL RIO	164.10	3	1	19655
T. DER. PONIENTE SAN JUAN DEL RIO	164.10	3	2	19847
T. IZQ. ACAMBARO	170.45	3	1	17560
T. IZQ. ACAMBARO	170.45	3	2	17525
T. DER. LIBRAMIENTO DE QUERETARO A SAN LUIS POTOSI	207.00	1	1	21660
T. DER. LIBRAMIENTO DE QUERETARO A SAN LUIS POTOSI	207.00	1	2	21420
T. DER. LIBRAMIENTO DE QUERETARO A SAN LUIS POTOSI	207.00	3	1	19105
T. DER. LIBRAMIENTO DE QUERETARO A SAN LUIS POTOSI	207.00	3	2	19122
QUERETARO	211.60			

SC: Sentido de circulación

**TABLA 2.2.** Aforos vehiculares en la Autopista México - Querétaro

Fuente: SCT, 2001

### II.2 Descripción física de la autopista México – Querétaro

Anteriormente se han mencionado ciertas generalidades de la autopista México – Querétaro, conviene ahora indicar algunas de las características del trazo geométrico del tramo en estudio.

El tramo en estudio se encuentra sobre las rutas Federales MEX 57 y MEX 57-D. Este tramo es parte de la ruta MEX 57-D hasta la intersección con el Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí, en el Km 198 y en adelante, la carretera en estudio cambia a la ruta MEX 57. El kilometraje de este tramo electo como caso de estudio se extiende desde el Km 43 al Km 212. Entre dichos puntos, se tiene una carretera del tipo A según la clasificación de la SCT, lo que indica que se trata de una autopista con al menos 4 carriles y división central, además de tener un bajo grado de curvatura y contar con carriles anchos. En el caso de la autopista México – Querétaro, existen 6 y en ocasiones hasta 8 carriles.

La división central es normalmente por medio de una barrera de contención, formada por bloques de concreto, aunque en algunos tramos, como ya se mencionó, la separación central está dada por separación en dos cuerpos de la carretera. Dicha separación de cuerpos se

presenta en 5 tramos, entre los Km 61 y 70, nuevamente entre los Km 81 y 85, entre los Km 149 y 152, igualmente entre los Km 153 y 159, y entre los Km 163 y 165, tal como se indica en la tabla 2.4.

SEPARACIÓN	INICIA EN KM	TERMINA EN KM
1	61 + 300	69 + 200
2	81 + 200	84 + 250
3	149 + 150	151 + 500
4	153 + 600	158 + 400
5	163 + 600	164 + 600

**TABLA 2.4.** Lugares de la autopista México – Querétaro en los que se presenta separación de terraplenes  
Fuente: INEGI

La autopista México – Querétaro hace intersección con las vialidades de la tabla 2.5 así como con varias vialidades menores, sin embargo las que son de relevancia en este estudio, son las que en dicha tabla se presentan, pues son en las que existen intersecciones a desnivel y además se permite el retorno de los vehículos:

CARRETERA	ruta	KILOMETRAJE
Entronque Jorobas – Tula de Allende	MEX 31	56 + 180
MEX 57 – Tlahuelilpa de Ocampo	HGO 17	69 + 360
Santo Domingo – MEX 57-D	EM 9 HGO 10	83 + 750
MEX 57-D – Tula de Allende	HGO	99 + 300
Jilotepec – Maravillas	EM 13	107 + 000
MEX 57-D - Aculco – MEX 55	EM	115 + 000
Toluca – Palmillas	MEX 55	148 + 500
Portezuelo – Palmillas	MEX 45	151 + 800
San Juan del Río – Xilitla	MEX 120	159 + 100
Libramiento San Juan del Río	QRO	164 + 100
La Noria – Acámbaro	MEX 120	175 + 450
San Clemente - El Saúz	QRO	180 + 250
Pedro Escobedo - Ajuchitlancito	QRO	187 + 200
El Colorado – Hiquerillas	QRO 4	197 + 850
Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí	MEX 57-D	198 + 000
Querétaro – MEX 120	QRO	201 + 800

**TABLA 2.5.** Vialidades que hacen intersección con la autopista México – Querétaro  
Fuente: INEGI

Las intersecciones de las carreteras MEX 57-D y QRO 4 con la autopista México - Querétaro son en realidad una sola intersección, que funciona con un distribuidor vial común para ambas vialidades. Existen también retornos al cruzar la zona urbana de Coyotepec en el Km 50+100 y en el Paraje San Francisco en el Km 156+100. Los retornos tienen un alto grado de importancia para determinar la ubicación de las estaciones de los EMS, pues son los lugares en los que es posible cambiar el sentido de tránsito de las unidades de rescate.

Para la atención de los accidentes, la autopista cuenta con 34 postes de auxilio, cada 2 o 3 km, en los lugares que en la tabla 2.6 se indican, así como con estaciones de servicios médicos en Tepeji del Río, en San Juan del Río y en la caseta de Palmillas.

TORRE	UBICACION	
Nº	KM.	CUERPO
1	46+600	MEX-QRO
2	48+950	QRO.MEX
3	51+700	MEX-QRO
4	54+500	QRO.MEX
5	58+050	MEX-QRO
6	61+000	QRO.MEX
7	63+900	MEX-QRO
8	66+900	QRO.MEX
9	70+080	MEX-QRO
10	72+700	QRO.MEX
11	76+650	MEX-QRO
12	78+700	QRO.MEX
13	83+750	MEX-QRO
14	85+020	QRO.MEX
15	87+800	MEX-QRO
16	91+000	QRO.MEX
17	94+000	MEX-QRO

TORRE	UBICACION	
Nº	KM.	CUERPO
18	96+700	QRO.MEX
19	100+000	MEX-QRO
20	102+750	QRO.MEX
21	106+000	MEX-QRO
22	108+800	QRO.MEX
23	112+000	MEX-QRO
24	115+000	QRO.MEX
25	117+950	MEX-QRO
26	121+000	QRO.MEX
27	124+000	MEX-QRO
28	126+750	QRO.MEX
29	130+500	MEX-QRO
30	132+600	QRO.MEX
31	135+980	MEX-QRO
32	139+700	QRO.MEX
33	142+000	MEX-QRO
34	145+200	QRO.MEX

**TABLA 2.6.** Localización de torres de auxilio vial en la Autopista México - Querétaro  
Fuente: SCT, 2001

### II.3 Accidentes en la autopista México - Querétaro

La distribución de los lugares en donde ocurren los accidentes vehiculares a lo largo de las carreteras, es prácticamente aleatoria, es decir no obedece a ninguna función de densidad de probabilidades, esto pensando en que pudieran conocerse dichos lugares antes de que los

accidentes viales sucedan. Actualmente, para la gran mayoría de las carreteras del mundo, dichos lugares conocidos como puntos negros, están plenamente identificados, sin embargo ello es gracias a reportes generados luego del acontecimiento de cada accidente.

En el caso de las autopistas de nuestro País, el organismo encargado de emitir dichos reportes es la Policía Federal de Caminos (PFC), que es una dependencia de la Policía Federal Preventiva (PFP). Los datos de tales reportes son recopilados en campo mediante inspección visual y llenando el formulario estándar que aparece en la figura 2.7, con el objeto de tener información similar en cada uno de los casos de accidente.

Para el presente estudio, se cuenta con los datos recopilados por la PFC en la autopista México - Querétaro, durante los años de 1996 y 1997 y en tales datos se observa que los lugares más conflictivos de esta carretera en cuanto a accidentes son los lugares cercanos a las casetas de cobro de Tepetzotlán y Palmillas, en los Km 43 al 52 y 150; el paso por la zona urbana de San Juan del Río, Qro entre los km 157 y 167 así como la zona con curvas pronunciadas entre los Km 203 y 209 poco antes de llegar a Querétaro.

Como se mencionó, el volumen de tránsito en esta carretera es grande y por ende, un factor que propicia una buena cantidad de los accidentes. Sin embargo, el factor al cual se debe la mayor cantidad de accidentes es el exceso de velocidad, pues de los 57,324 accidentes registrados en el 2000, más de 48,000 ocurrieron por fallas del conductor, como lo indica la tabla 2.7, y dentro de ellos, casi 30,000 se debieron al exceso de velocidad. Es importante hacer mención de ello, pues en esta autopista es común que se excedan los límites de velocidad.

FACTOR QUE CAUSA EL ACCIDENTE	ACCIDENTES
FACTOR HUMANO	48,892
FACTOR CAMINO	2,167
FACTOR AGENTE NATURAL	2,216
FACTOR VEHICULO	4,049
<b>TOTAL</b>	<b>57,324</b>

**TABLA 2.7.** Principales causas de los accidentes vehiculares en la Autopista México - Querétaro  
Fuente: PFP, 2000



En la serie estadística de los accidentes de la autopista, que incluye los años 1991 a 1998, se observa que no hay una tendencia definida en cuanto al comportamiento del número de accidentes, ni en cuanto a la relación de tal cifra con respecto al número de vehículos - Km que circulan sobre la carretera en cuestión, como se observa en la figuras 2.2 y 2.3.

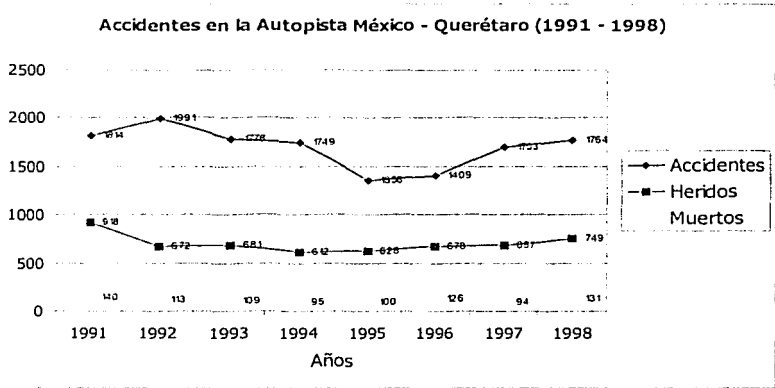


FIGURA 2.2. Total de accidentes en la Autopista México - Querétaro  
FUENTE: PFP, 1999

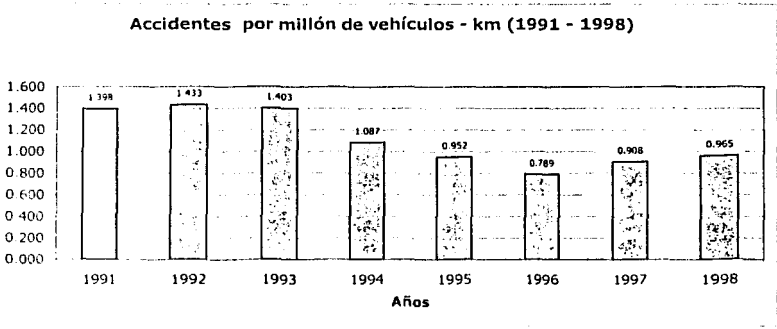


FIGURA 2.3. Total de accidentes por millón de vehículos - km en la Autopista México - Querétaro  
Fuente: PFP, 1999

Para efectos del nivel de seguridad que se tiene en esta carretera, en la tabla 2.8 se hace la comparación con las estadísticas de otras carreteras del país y puede decirse que se trata de una autopista poco segura, pues el número de accidentes por millón de vehículos - km es mayor al de casi todas las demás carreteras con las que se comparó, a excepción de las autopistas que parten de la Ciudad de México a Puebla y Toluca, mismas que son más sinuosas.

Orden	Clave	Carretera	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	Promedio
1	45 D	QRO - Irapuato	0.632	0.534	0.743	0.520	0.409	0.591	0.578	0.572
2	57	QRO - SLP	1.404	1.431	0.895	0.660	0.751	0.708	0.902	0.964
3	85 D	MX - PCA	1.256	1.342	1.346	1.145	0.890	0.682	0.639	1.043
4	132 D	MX - Teotihuacan	1.353	1.085	0.873	1.352	0.882	0.868	1.110	1.075
5	57 D	MX - QRO	1.398	1.433	1.403	1.087	0.952	0.789	0.908	1.139
6	15 D	MX - TOL	0.880	1.012	0.782	1.168	1.946	3.648	1.963	1.628
7	150 D	MX - PUE	1.993	1.862	1.846	1.719	1.578	1.289	1.191	1.640

**TABLA 2.8.** Accidentes por millón de vehículos - km para distintas autopistas de México  
**Fuente:** FFP

Por último, partiendo de la estadística anterior, al ser esta una vía muy transitada, resulta sencillo comprender que los totales del número de accidentes, de las víctimas acaecidas en ellos así como de las pérdidas materiales a causa de los accidentes son mucho mayores a los que se presentan en casi todas las demás carreteras, por lo cual, la atención en materia de seguridad de la autopista México - Querétaro resulta de primordial importancia.

En las figuras del anexo 2, se presenta la ubicación de la autopista México - Querétaro dentro de la República Mexicana así como un mapa temático con los accidentes por kilómetro que se presentaron en el año de 1997 entre cada par de retornos.

### III. TEORÍA DE LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS

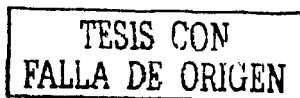
#### *III.1 Motivos para el empleo de la teoría de localización de servicios*

Una correcta ubicación geográfica de los servicios es normalmente necesaria e importante en la mayoría de los procesos, pues generalmente en el caso de los servicios se trata de instalaciones valiosas y para las cuales el cambio de sede resulta poco práctico además de costoso. De esta manera, tanto dependencias gubernamentales como empresas privadas e incluso los individuos, tienden a buscar la ubicación óptima de sus bienes. Ejemplos de esto son la ubicación de bases militares, la localización de una planta ensambladora o el lugar en el que se colocará el teléfono dentro de casa [1].

La localización óptima depende de lo que se considere más importante en cada caso, como pueden ser el tiempo de respuesta a los lugares de demanda, el costo que tiene moverse a los lugares de demanda, o bien, el que haya cobertura total sobre un área determinada. Así, para determinar la ubicación adecuada de un servicio, se deben definir primero los parámetros respecto de los cuales tendrá lugar la optimización. Lo anterior constituye las bases que han conducido al planteamiento del llamado "problema de localización de servicios" y a la búsqueda de la solución del mismo mediante el conjunto de técnicas conocido como "teoría de localización de servicios".

Al hablar de la teoría de localización de servicios, se hace referencia a un conjunto de técnicas poco comunes fuera del ámbito de la Ingeniería de Sistemas, sin embargo dentro de ese contexto, es el mencionado un grupo de técnicas de gran importancia. La teoría de localización de servicios ha ofrecido históricamente, como se explicará en los apartados siguientes, y ofrece en la actualidad un fuerte potencial para la solución de problemas en los que el objetivo sea localizar uno o más servicios que satisfagan las necesidades de uno o más usuarios o centros de demandas.

En el caso particular de este estudio, el problema consiste en localizar los servicios de emergencia para atender los accidentes en una carretera y la teoría de localización brinda los elementos teóricos necesarios y suficientes para abordar el problema y solucionarlo, pues como



se indicará más adelante en este capítulo, una de las aplicaciones más frecuentes de la teoría de localización de servicios es el caso de la localización de los servicios de emergencia (estaciones de bomberos, de policía, hospitales, etc.) y uno de los problemas particulares que ha abordado dicha teoría es aquel en el que son importantes los tiempos de respuesta a los puntos de demanda, tiempos mismos que son trascendentales para los fines del presente estudio.

### *III.2 Breve historia*

Los orígenes de la teoría de localización de servicios se remontan al renacimiento, siendo Bonaventura Cavalieri en 1647, el primer investigador en la literatura matemática en considerar el problema de determinar un punto, tal que la suma de sus distancias a otros tres puntos dados, fuera mínima. Demostró que cada lado del triángulo formado por los otros tres puntos debe tener un ángulo menor a 120 grados, con la línea de uno de los dos vértices del lado hacia el punto dado [2]. Poco más de un siglo después, en 1774 Giovanni Fagnano demostró que el punto para el cual la suma de las distancias a los vértices de una cuadrilátero es mínima, está dada por la intersección de las diagonales [3] y el matemático francés Tedenat en 1810 encontró para el caso de  $n$  puntos, la siguiente condición necesaria: la suma de los cosenos y senos de los ángulos anteriormente mencionados debe ser igual a cero.

Sin embargo, la teoría de localización como tal, es decir, como la herramienta matemática para resolver problemas de un tipo específico (problemas de localización), fue introducida en 1909 por Alfred Weber, cuando consideró el problema de localizar una bodega industrial para minimizar la distancia total que se viajaría para atender a un conjunto de clientes espacialmente distribuidos [4]. Siguió a los trabajos de Weber los del economista Harold Hotelling quien se planteó en 1929 otro de los primeros problemas de localización; al considerar el problema de localizar a dos empresas competidoras sobre la misma línea recta; y durante de las décadas de los 50's y de los 60's varios autores atendieron el problema del diseño e implementación de sistemas de servicios, considerando algunos incluso factores económicos y la posibilidad de emplear de la teoría de redes [5].



No obstante, hasta antes de la segunda mitad de los años 60's los trabajos en este campo de la Ingeniería de Sistemas consistían en un número de aplicaciones aisladas, sin que existiera cohesión alguna que formara una teoría unificada entre las líneas de investigación, hasta que en 1964, a raíz de la publicación de un artículo acerca de las investigaciones de S. Louis Hakimi, se despertó en los científicos un fuerte interés teórico. En tal trabajo se planteaba el problema de localizar uno o más servicios en una red tratando de minimizar ya fuera la suma de las distancias o la distancia más larga entre los servicios y los puntos de demanda [6].

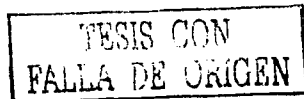
De esta manera, el campo de investigación en el área de localización de servicios ha permanecido activo cerca de 40 años, bajo el enfoque común de la teoría de localización.

### *III.3 El problema de la localización de servicios*

Como se observa en el apartado anterior, la teoría de localización de servicios es una parte de la Ingeniería de Sistemas que fue abordada formalmente por los investigadores a principios del siglo XX lo cual implica su desarrollo a través de casi cien años. Como consecuencia lógica de esto, las áreas en las cuales ha encontrado aplicación y el tipo de problemas particulares que se han resuelto con el empleo de esta técnica resultan muy diversos.

En la tabla 3.1 se hace una clasificación de las principales áreas en las cuales ha encontrado su aplicación práctica la teoría de localización, con base en los artículos que han sido publicados por diversos investigadores de la Ingeniería de Sistemas.

Dentro de cada uno de esos campos, es muy difícil generalizar al tipo de problemas que la teoría de localización ha dado solución, pues las clases de problemas de localización resultan ser tan variadas según las características particulares de cada caso, que incluso tratándose de problemas dentro de la misma área de aplicación, pueden presentarse una gran cantidad de variantes.



▪ **En el sector privado**

---

- Localización de bodegas o centros de producción
- Localización de centros de manufactura
- Localización de nodos de comunicaciones
- Localización de vehículos de servicio privado (taxis, vehículos turísticos)
- Localización de equipo de servicio privado (cajas de seguridad, gasolineras)
- Localización de centros de transporte (puertos, terminales de autobuses)
- Localización de lugares de depósito de materiales peligrosos (desechos tóxicos, plantas nucleares)

▪ **En el sector público**

---

- Localización de servicios y vehículos de emergencia
- Localización de centros de servicio público (centros de salud, subestaciones eléctricas, etc.)
- Diseño de redes públicas (redes de agua potable, redes de electricidad)
- Localización de zonas residenciales
- Localización de instalaciones de defensa

**TABLA 3.1** Áreas en las que se ha aplicado la teoría de localización de servicios.

**Fuente:** [7]

Antes de presentar una taxonomía de las variantes que puede presentar este problema, conviene clarificar un poco más mediante una definición del problema de localización de servicios: es aquel problema cuyo objetivo es ubicar espacialmente a uno o más recursos (servicios), de tal manera que atiendan óptimamente a un conjunto de centros de demanda (usuarios) que se hallan en el mismo espacio, entendiendo por óptimamente, a prestar el servicio consumiendo únicamente los recursos necesarios (tiempo y/o dinero y/o espacio, etc.) y apeándose a las particularidades de cada caso (restricciones).

La clasificación de las variantes del problema que más se ha empleado, es aquella que agrupa a éstos según la configuración del espacio en el que pueden localizarse tanto los servicios como los usuarios. A tales efectos, son los problemas de localización continuos, discretos o de redes.

En los problemas de localización continuos existe una gama de posibilidades para localizar los servicios, ya que se pueden ubicar en cualquier punto del espacio del que se trate. En los discretos, los servicios pueden estar ubicados solamente en lugares determinados del espacio y cuando se trata de redes, los servicios solamente se pueden ubicar sobre los arcos o los nodos de la red. Lo mismo sucede con las restricciones que presenten los usuarios, pues estos también pueden componer un problema continuo, discreto o de redes, dando lugar a una serie de opciones, pues se pueden originar problemas con servicios continuos y centros de demanda continuos; con servicios continuos y centros de demanda discretos, etc.

Como se ha mencionado, la anterior es una forma muy recurrida para clasificar a los problemas de localización, sin embargo, hay muchas más variables que entran en juego cuando se trata de la localización de servicios, y que por tanto es necesario tomar en cuenta, ya que en el caso de la taxonomía anterior, solamente se considera a la variable que define la estructura topológica en que se desarrolla el problema.

En la tabla 3.2 se presenta una taxonomía más detallada, de aquellas variantes del problema de localización que hasta la fecha han sido abordadas.

Dicha tabla 3.2, indica 3 niveles en los que es posible clasificar los problemas de localización, niveles mismos que no son mutuamente excluyentes, sino complementarios. El primero y más general de esos niveles es aquel que clasifica a los problemas según los objetivos que se plantean en cada caso. El segundo nivel cataloga a los problemas según las variables de decisión a las que atiende el problema y por último, en el tercero de los niveles, los problemas son evaluados en cada uno de los parámetros que definen el sistema particular. De esta manera, lo más conveniente para diferenciar con precisión entre los problemas, es ubicar a cada uno de ellos dentro de cada uno de los niveles.

I	Objetivos	<p>Optimización</p> <p>Minimizar tiempo o costo medio de viaje</p> <p>Maximizar ganancia neta</p> <p>Minimizar el tiempo medio de respuesta</p> <p>Minimizar el máximo tiempo o costo de viaje</p> <p>Maximizar el mínimo tiempo o costo de viaje</p> <p>Maximizar el tiempo o costo medio de viaje</p> <p>Maximizar el costo del servicio sujeto a restricciones, para ofrecer servicio mínimo</p> <p>Optimizar la función de utilidad dependiente de la distancia</p> <p>Otros</p> <p>No Optimización</p>	<p>Distancias entre punto de servicio y demanda</p> <p>Distancias entre servicios</p> <p>Localización de un servicio absoluto</p> <p>Distancias del servicio a los puntos de distribución</p> <p>Otros</p>	<p>Ponderada vs. no ponderada</p> <p>Considerando algunos puntos vs considerando todos</p> <p>Kutas establecidas vs. ruta más corta</p>
		<p>Localización del servicio o bien</p> <p>Área de servicio o prioridades de respuesta</p> <p>Número de servicios y/o bienes</p> <p>Capacidad o volumen de los servicios</p> <p>Tipo de bienes producidos por cada servidor</p> <p>Enrutamiento o flujos del servicio o de los bienes a los puntos de demanda</p> <p>Facibilidad de colas</p> <p>Otros</p>	<p>Localización del servicio o bien</p> <p>Área de servicio o prioridades de respuesta</p> <p>Número de servicios y/o bienes</p> <p>Capacidad o volumen de los servicios</p> <p>Tipo de bienes producidos por cada servidor</p> <p>Enrutamiento o flujos del servicio o de los bienes a los puntos de demanda</p> <p>Facibilidad de colas</p> <p>Otros</p>	
III	Parámetros del sistema	<p>Estructura topológica</p> <p>Área vs. Arbol vs. Red vs. Plano vs. Espacio de <math>n</math> dimensiones</p> <p>Direcida vs. No dirigida</p> <p>Métrica del viaje</p> <p>Restringida por la red vs. rectilínea vs. euclidiana vs. Manhattan vs. Curvilínea vs. <math>L_1</math> vs. otros</p> <p>Tiempo o costo del viaje</p> <p>Determinístico vs. Probabilístico</p> <p>Restringido vs. No restringido</p> <p>Dependiente del volumen vs. independiente del volumen</p> <p>Demanda</p> <p>Continua vs. Discreta</p> <p>Determinística vs. Probabilística</p> <p>Dependiente del costo vs. Independiente del costo</p> <p>Variable en el tiempo vs. No variable en el tiempo</p> <p>No de servicios</p> <p>No de bienes</p> <p>Localización de los servicios</p> <p>Restringida vs. No restringida</p> <p>No finito vs. No infinito de localizaciones potenciales</p> <p>Equo vs. Dependiente del estado del sistema</p> <p>Costo de ubicación igual vs. distinto de cero</p> <p>Determinística vs. Probabilística</p> <p>Costo fijo igual vs. distinto de cero</p> <p>Capacidad de los servicios</p> <p>Capacitados vs. No capacitados</p> <p>Confiable vs. No confiable</p> <p>Área de servicio y probabilidades de despartido</p> <p>Servicios cooperativos vs. No cooperativos</p> <p>Área de servicio a la distancia más corta vs. Área de servicio en otras distancias</p> <p>Disciplina de los servicios</p> <p>FIFO vs. Clases Prioritarias vs. Regulado por la Orientación Espacial vs. Otros</p> <p>Facibilidad de colas</p>	<p>Estructura topológica</p> <p>Área vs. Arbol vs. Red vs. Plano vs. Espacio de <math>n</math> dimensiones</p> <p>Direcida vs. No dirigida</p> <p>Métrica del viaje</p> <p>Restringida por la red vs. rectilínea vs. euclidiana vs. Manhattan vs. Curvilínea vs. <math>L_1</math> vs. otros</p> <p>Tiempo o costo del viaje</p> <p>Determinístico vs. Probabilístico</p> <p>Restringido vs. No restringido</p> <p>Dependiente del volumen vs. independiente del volumen</p> <p>Demanda</p> <p>Continua vs. Discreta</p> <p>Determinística vs. Probabilística</p> <p>Dependiente del costo vs. Independiente del costo</p> <p>Variable en el tiempo vs. No variable en el tiempo</p> <p>No de servicios</p> <p>No de bienes</p> <p>Localización de los servicios</p> <p>Restringida vs. No restringida</p> <p>No finito vs. No infinito de localizaciones potenciales</p> <p>Equo vs. Dependiente del estado del sistema</p> <p>Costo de ubicación igual vs. distinto de cero</p> <p>Determinística vs. Probabilística</p> <p>Costo fijo igual vs. distinto de cero</p> <p>Capacidad de los servicios</p> <p>Capacitados vs. No capacitados</p> <p>Confiable vs. No confiable</p> <p>Área de servicio y probabilidades de despartido</p> <p>Servicios cooperativos vs. No cooperativos</p> <p>Área de servicio a la distancia más corta vs. Área de servicio en otras distancias</p> <p>Disciplina de los servicios</p> <p>FIFO vs. Clases Prioritarias vs. Regulado por la Orientación Espacial vs. Otros</p> <p>Facibilidad de colas</p>	

TABLA 3.2 Taxonomía para distinguir entre los distintos tipos de problemas de localización

Fuente: [130]



En 1988, Brandeau y Chiu, se dieron a la tarea de hacer una revisión de los tipos de problemas de localización que hasta ese entonces se habían estudiado, y empleando la taxonomía de la tabla 3.2, distinguieron 54 diferentes problemas [7]. En la ocasión del presente estudio, se hace un ejercicio similar y se clasifica al problema de la localización de los EMS en carreteras que en esta tesis se plantea y resuelve:

1. Objetivo: Minimización del Máximo Tiempo de Viaje
2. Variables de Decisión: Localización de los Servicios / Área de Servicio
3. Parámetros del Sistema:
 

Estructura Topológica:	Red
Métrica del viaje:	Restringida por la red
Tiempo del viaje:	Determinístico
	Restringido
	Independiente del volumen
Demanda:	Continua
	Determinística
	Independiente del costo
	No variante en el tiempo
Número de servicios y facilidades:	p
Número de bienes:	1
Localización de los servicios:	Restringida
	No. potencial de localizaciones finito
	Fija
	Costo de relocación igual a cero
	Determinística
	Costo fijo igual a cero
Capacidad de los servicios:	Capacitados
	Confiables
Área de servicio y prioridades:	Servidores no cooperativos
	Servicio al área más cercana
Disciplina de servicio:	Ninguna

Al respecto de cada una de las consideraciones anteriores, se presenta una mejor descripción en el siguiente capítulo, cuando se presenta el algoritmo de solución al problema.

#### *III.4 Técnicas de solución para problemas de localización*

Como es natural, se ha desarrollado una variedad de diferentes soluciones para los problemas de localización, a dichas soluciones se les puede agrupar dentro de dos grandes categorías: las soluciones exactas y las soluciones heurísticas según se muestra en la tabla 3.3. En dicha tabla, también se presenta además el grupo de técnicas que se han desarrollado para la evaluación de la calidad de las técnicas heurísticas.

##### *Soluciones exactas.*

Una de las condiciones para que los problemas dentro de la Ingeniería de Sistemas puedan tener una solución exacta, es que sean convexos y se ha demostrado que muchos problemas de localización de un solo servicio en regiones planas son convexos y por tanto, pueden desarrollarse las condiciones analíticas suficientes y necesarias para una solución óptima. Algunos problemas de localización para dos servicios simples en redes de árbol (que no son convexas), se han resuelto también de manera exacta empleando las propiedades de convexidad parcial. De la misma manera, para otros problemas de localización de un solo servicio se ha desarrollado una solución que consiste en la descomposición de la red en segmentos de una red de árbol para llegar a una función objetivo-convexa [7].

Otros problemas de localización que han sido resueltos de manera exacta son aquellos en los que la demanda es discreta y además la localización de los servicios también lo es. Igualmente se han resuelto los problemas del  $p$  centro y la  $p$  media en redes generales con demandas discretas empleando programación lineal y entera, así como los problemas de localización de servicios con distancias rectangulares mediante métodos de búsqueda combinatoria en árboles. Otras formas de resolver problemas de localización en forma exacta es empleando los métodos Branch and Bound y las programaciones convexas, dinámica discreta y reversible [7].

Técnicas Exactas de Solución	Solución Analítica / Resultado Óptimo
	Programación Entera / Branch and Bound
	Programación Dinámica / Programación reversible
	Programación Convexa
	Otras
Técnicas Heurísticas de Solución	Algoritmos de Sustitución
	Algoritmos Glotones
	Algoritmos de goteo
	Localización y Asignación Secuenciales
	Solución de un problema aproximado
	Solución de un problema relajado
	Solución de un problema restringido
Otras	
Técnicas para la Evaluación de las Heurísticas	Bound en la solución óptima
	Análisis del peor caso
	Análisis probabilístico
	Estimación estadística
	Regla de paro

**TABLA 3.3** Técnicas de solución para los problemas de localización  
Fuente: [7]

### *Soluciones heurísticas.*

Aún cuando lo anterior indica que hay muchos problemas de localización que han sido resueltos con técnicas exactas existen otros, que por su configuración tienen muchas soluciones óptimas potenciales para ser resueltos de manera práctica usando dichas técnicas; además muchos otros problemas de localización como por ejemplo todos aquellos en los cuales los

servicios pueden ser localizados en cualquier lugar de una región topográfica pueden llegar a tener un número infinito de soluciones óptimas potenciales y por ello no ser resueltos por métodos basados en la enumeración. Igualmente la dificultad es evidente si se observa que la derivada de la función objetivo para muchos de estos problemas no existe así que técnicas de optimización diferencial no pueden ser aplicadas. Incluso para problemas con sus derivadas bien definidas la función objetivo es típica y también no convexa, con la posibilidad de muchas soluciones óptimas locales.

Las dificultades computacionales que lo anterior representa, han llevado al desarrollo de técnicas heurísticas de solución. El término *heurístico* procede del griego antiguo "*heuriskein*" y significa hallar o descubrir [8] y un algoritmo heurístico puede definirse como sigue:

"Una técnica heurística es aquella que busca buenas soluciones (por ejemplo, cercanas a la óptima), a un costo computacional razonable sin que garanticen que la solución es óptima o viable, sin saber incluso en muchos casos, qué tan cerca de la solución óptima se está." [9]

Los algoritmos heurísticos varían considerablemente dependiendo del problema en particular que atacan. Algunos de estos algoritmos funcionan de manera similar en cuanto a que se trata de métodos iterativos y que buscan siempre encontrar una solución que mejore a la de la iteración anterior, o en su caso, que resulte menos perjudicial.

Otras técnicas heurísticas se basan en la solución de problemas similares al que desean resolver, mediante técnicas exactas u otras técnicas heurísticas. Se han propuesto así, además de la adaptación de la solución de problemas parecidos, algoritmos basados en la solución de un problema inducido mediante modificaciones en la ubicación de los servicios o de los centros de demanda, teniendo siempre forma de control sobre las afecciones provocadas por dichas modificaciones [7].

*Técnicas de evaluación de las heurísticas*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Dada la gran cantidad de problemas que se ha resuelto con el empleo de métodos heurísticos, los investigadores han estudiado las formas en que es posible determinar la calidad

de la solución heurística propuesta. Normalmente estas técnicas de evaluación se basan en la probabilidad y estadística para medir los niveles de servicio de los bienes o servicios que se ubican en los lugares que resultaron de la aplicación de la heurística, así como para extrapolar a condiciones de servicio mínimo o al peor caso de demanda posible.

## REFERENCIAS

- [1] Aceves, R., Teoría de Localización, Secretaría de Desarrollo Social, 1994
- [2] Cavalieri, B., Exercitationes Geometricae Sex, 1647
- [3] Fagnano, G., Nova Acta Eruditorum, 1774
- [4] Weber, a., Über den Standort der Industrien, 1909
- [5] Hotelling, H., Stability in Competition, *Economic Journal*, 39 (1929), 41-57
- [6] Hakimi, S. L., Optimal Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, *Operations Research*, 12 (1964), 450-459
- [7] Brandeau, M.L. and S.S. Chiu, An overview of Representative Problems in Location Research, *Management Science*, 35 (1989), 645-674
- [8] Avella, P. et al., Some Personal Views on the Current State and the Future of Locational Analysis, *European Journal of Operational Research*, 104, 2 (January), 1998, 269-287
- [9] C. Reeves, editor, Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Optimization, McGraw-Hill International (UK) Ltd., 1995

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV. ALGORITMO DE SOLUCIÓN Y RESULTADOS

Conviene, antes de entrar al detalle de las características que hacen tan singular al problema que aquí se plantea, explicar lo que para fines de este estudio se entiende por “Problema de localización de los Servicios Médicos de Emergencia (EMS) en Carreteras”.

En el presente trabajo se trata de dar solución a un problema de localización, lo que significa que el objetivo es ubicar servidores, en este caso los EMS; que atiendan a una cierta demanda: los accidentes de tránsito; estando ambos, servicios y demanda sobre un espacio determinado: las carreteras. Se definen entonces a continuación los conceptos de EMS, accidente de tránsito y carretera para fines de esta tesis.

Se entiende como EMS al conjunto de equipos, humano y material, que permiten prestar la primera asistencia a víctimas de los accidentes vehiculares. El equipo material que se considera como necesario lo componen las ambulancias, debidamente dotadas de instrumental y consumibles médicos así como de los sistemas de telecomunicaciones que permitan recibir los avisos de accidentes y el equipo humano necesario lo constituyen las brigadas capacitadas para asistir a los accidentados, generalmente compuestas por conductores de las ambulancias y médicos o paramédicos.

Se entiende por accidente de tránsito: “Evento inesperado y adverso; puede ser una caída, choque, colisión o explosión; ocurrido en un camino público en que se involucra al menos un vehículo en movimiento.” [1]

Se define como carretera a la franja sobre la superficie terrestre que permite el movimiento sobre de sí de vehículos automotores. Incluye al derecho de vía. [2]

##### *IV.1 Particularidades del problema de localización de los EMS para carreteras*

Según lo descrito en el capítulo anterior, son muchas las variantes del problema de localización y de acuerdo con el ejercicio de aplicar el método que indica la taxonomía presentada al problema que da origen a este trabajo de tesis, se encuentra que el

problema de localización de los servicios de emergencia en carreteras es un caso muy particular del problema de localización.

A grandes rasgos, la particularidad del problema que en este estudio se plantea radica en dos aspectos:

- 1) La configuración de la red**, pues respecto de las carreteras no se puede hablar de una red orientada, en la que estén claramente definidos los nodos fuente y sumidero, dado que siempre existe la posibilidad de que los viajes ocurran en uno u otro sentido. Tampoco debe pensarse en nodos conexos entre sí mediante un solo arco, ya que atendiendo al caso de las autopistas de cuerpos separados, o bien a aquel de los pares viales, como ejemplos, se observa que los arcos sobre los cuales marchan los vehículos en un sentido no son necesariamente idénticos a aquellos sobre los cuales los vehículos avanzan en sentido contrario. Incluso en muchas ocasiones, las rutas de ida y de vuelta ocupan espacios geográficos totalmente distintos entre sí.

Además en el caso de las carreteras, se trata de estructuras que enlazan puntos de manera consecutiva, es decir, no se pueden "saltar" nodos para ir de un origen a un destino, esto es, no se puede llegar del nodo 1 al nodo 3, sin antes pasar por el nodo 2, salvo en un caso aún más particular que es el de considerar para su análisis a un sistema carretero formado por más de una vía; de tal manera que normalmente se debe pensar en una red que tenga una forma lineal.

- 2) La naturaleza de los servicios a prestar**, ya que al tratarse de servicios de emergencia, la condición para considerar que se ofrece un buen servicio, se puede definir como el contar con la capacidad de atender un accidente en cualquier punto de la red (arcos y nodos) dentro de un tiempo de respuesta aceptable de acuerdo con lo descrito en el primer capítulo.

Lo anterior ofrece sustento a la posibilidad de que en ocasiones se tengan que localizar varios servidores.

Los aspectos que restringen la configuración de la red así como la idea del servicio que se pretende brindar a los usuarios de la carretera, dan por resultado una red que se puede esquematizar como se muestra en la figura 4.1. Tales consideraciones restrictivas a la red, explican la forma de los arcos de la red que aparece en la figura y la posición de los nodos surge de hacer la consideración de que los lugares en los cuales conviene, más a priori, ubicar a los EMS, son aquellos puntos en los cuales es posible que los EMS elijan entre dos arcos distintos para iniciar su trayecto, es decir en aquellos puntos en los que es factible el cambio de sentido al circular sobre la carretera (retornos). Estos puntos de retorno pueden corresponder a pasos a desnivel, a glorietas, a lugares en los que se permite la vuelta en "U", a zonas urbanas, etc.

La posibilidad de que se tengan que designar a varios lugares como aquellos en los que se ubican varios servidores conduce al razonamiento de que la solución a esta variante del problema de localización no es exacta, por lo que habrían de probarse los métodos heurísticos con el objeto de obtener una buena solución.

Buscar en literatura propia de la Ingeniería de Sistemas, un método heurístico que resolviera el problema de localización para la configuración de la red que se propone, recordando además que en este caso la demanda es continua sobre la red y la solución debe ser discreta es una labor que no rinde mayores frutos, pues si bien autores como Handler y Mirchandani [3] consideran el caso de demanda continua y servicio discreto en redes generales, su solución para este caso resulta muy laboriosa y los objetivos de optimización no son necesariamente los mismos.

Por lo tanto, en este estudio se decide que lo mejor para resolver el problema, a un costo factible es el desarrollo de un algoritmo heurístico que funciona a base de iteraciones sucesivas, mismo que en el siguiente apartado se presenta.



CARRETERA DE DOBLE SENTIDO CON SEPARACIÓN DE CUERPOS Y/O DIVISIÓN CENTRAL

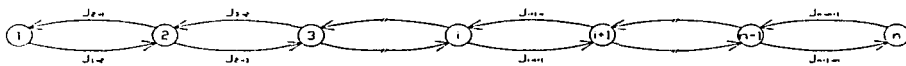
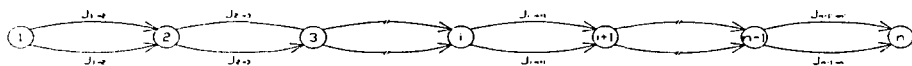


FIGURA 4.1 Representación gráfica de la red propuesta como modelo general para las carreteras

CARRETERA DE UN SOLO SENTIDO CON SEPARACIÓN DE CUERPOS Y/O DIVISIÓN CENTRAL



CARRETERA DE UN SOLO SENTIDO SIN SEPARACIÓN DE CUERPOS NI DIVISIÓN CENTRAL



FIGURA 4.2 Representación gráfica de otros modelos de redes para carreteras

## IV. 2 Presentación del algoritmo de solución

### A) Preparación del algoritmo

Aquí se presentan las condiciones que dan lugar y que son generales durante el desarrollo de todo el proceso que compone al algoritmo.

#### A-1) Definición del tiempo límite máximo de respuesta (tiempo crítico teórico)

Los EMS deben acudir a cualquier punto de cualquier arco de la red en un tiempo  $t < t_{\alpha}$ ; en donde  $t_{\alpha}$  es aquel tiempo máximo que es aceptable para el usuario del algoritmo como tiempo de respuesta de las unidades de los EMS a los lugares de los accidentes y que se denomina tiempo límite máximo de respuesta.

#### A-2) Nomenclaturas y convenciones de los componentes de la red.

Sea  $\mathbf{I}$  el conjunto de nodos de una red como la que se presenta en la figura 4.1:

$\mathbf{I} = \{1, 2, \dots, i-1, i, i+1, i+2, \dots, n-1, n\}$ , en donde:  $n$ : número total de nodos de la red.

Sea  $\mathbf{J}$  el conjunto de arcos del tipo  $J_{\text{nodo de origen} \rightarrow \text{nodo de destino}}$  de una red como la que se presenta en la figura 4.1:

$\mathbf{J} = \{\mathbf{J}_+, \mathbf{J}_-\}$ ; en donde  $\mathbf{J}_+$  y  $\mathbf{J}_-$  son dos subconjuntos de  $\mathbf{J}$  que se definen mediante el empleo de la anterior nomenclatura como:

$$\mathbf{J}_+ = \{J_{1 \rightarrow 2}, J_{2 \rightarrow 3}, \dots, J_{i-1 \rightarrow i}, J_{i \rightarrow i+1}, J_{i+1 \rightarrow i+2}, \dots, J_{n-2 \rightarrow n-1}, J_{n-1 \rightarrow n}\}$$

$$\mathbf{J}_- = \{J_{2 \rightarrow 1}, J_{3 \rightarrow 2}, \dots, J_{i \rightarrow i-1}, J_{i+1 \rightarrow i}, J_{i+2 \rightarrow i+1}, \dots, J_{n-1 \rightarrow n-2}, J_{n \rightarrow n-1}\}$$

**CONVENCIÓN:** Se dice que se recorre la red en sentido "positivo" si se la recorre total o parcial y estrictamente en el sentido que guardan los arcos de  $J$ . es decir, en sentido de nodos origen con valores menores a aquellos de los nodos destino.

**CONVENCIÓN:** Se dice que se recorre la red en sentido "negativo" si se la recorre total o parcial y estrictamente en el sentido que guardan los arcos de  $J$ . es decir, en sentido de nodos origen con valores mayores a aquellos de los nodos destino.

**CONVENCIÓN:** Se dice que un arco de  $J$ . se cubre "por la derecha" si el valor numérico del nodo en el cual se ubica el servidor que le atiende es mayor al valor numérico de su nodo de inicio.

**CONVENCIÓN:** Se dice que un arco de  $J$ . se cubre "por la izquierda" si el valor numérico del nodo en el cual se ubica el servidor que le atiende es menor o igual al valor numérico de su nodo de inicio.

**CONVENCIÓN:** Se dice que un arco de  $J$ . se cubre "por la derecha" si el valor numérico del nodo en el cual se ubica el servidor que le atiende es mayor o igual al valor numérico de su nodo de inicio.

**CONVENCIÓN:** Se dice que un arco de  $J$ . se cubre "por la izquierda" si el valor numérico del nodo en el cual se ubica el servidor que le atiende es menor al valor numérico de su nodo de inicio.

### **A-3) Definición de las operaciones básicas a realizar con los componentes de la red.**

**DEFINICIÓN:** Del concepto de movimiento

Se entiende por un movimiento sobre la red al hecho de recorrer en su totalidad uno y solo un arco para ir de un nodo origen a un nodo destino, que en tal caso, deben ser consecutivos en sus valores.

**DEFINICIÓN:** Del concepto de lejanía entre dos arcos

Sean  $J_{i \rightarrow i+1}$  y  $J_{j+1 \rightarrow j}$  dos arcos cualesquiera pertenecientes a  $\mathcal{A}$

Se entiende por lejanía entre esos dos arcos cualesquiera de la red, a aquel escalar que indica el número mínimo de desplazamientos necesarios, para ir del nodo de origen del primero al nodo de destino del segundo de los arcos y que se denota por:

$$\Lambda[J_{i \rightarrow i+1}; J_{j+1 \rightarrow j}] = |i - j|$$

**DEFINICIÓN:** Del concepto de longitud de un arco

Sean  $J_{i \rightarrow i+1}$  un arco cualquiera perteneciente a  $\mathcal{A}$

Se conoce por longitud de ese arco cualquiera de la red a aquel escalar que indica la cantidad en unidades de longitud de la distancia necesaria para realizar uno y solo un movimiento sobre dicho arco y que se denota por:

$$l[J_{i \rightarrow i+1}]: \text{longitud del arco } J_{i \rightarrow i+1}$$

Una vez que se ha definido el concepto de longitud de un arco, es posible conocer el tiempo que se tarda en recorrerlo de conocerse la velocidad con que ello se hace:

$$t_{i \rightarrow i+1} = l[J_{i \rightarrow i+1}] / v; \quad v = \text{velocidad media de los EMS sobre el arco } J_{i \rightarrow i+1}$$

De esta forma es posible determinar la longitud del arco más largo que se puede cubrir si se emplea como restricción a  $t_{ci}$ .

$$t_{\alpha} = l[J_c]_t / v; \quad \text{sea } l_{\alpha} = l[J_c]_t$$

$$t_{\alpha} = l_{\alpha} / v$$

Si no se cumple que  $t_{i, i+1} < t_{\alpha}$  para todos y cada uno de los arcos de la red, se debe modificar ya sea el valor de  $t_{ct}$ , o bien, el valor de  $v$ .

## B) Inicialización del algoritmo

El algoritmo se inicializa al proponer una primera iteración distinta de las subsecuentes, si es que dichas iteraciones subsecuentes son necesarias.

### B-1) Primera iteración (distinta de las subsecuentes)

$$\alpha = 1$$

#### B-1-1) Búsqueda del arco a cubrir $J_c$ (arco crítico)

Para inicializar cada una de las iteraciones del algoritmo, se comienza por proponer a un arco a cubrir, con sus particularidades dependiendo de la iteración de que se trate. En esta primera iteración se busca dar cobertura al arco más difícil de cubrir de toda la red en términos del tiempo de respuesta, es decir a aquel cuya longitud es la mayor de entre todos los arcos y que se denota por  $J_c$ . De esta manera, se garantiza que incluso el lugar más inaccesible de la red recibirá un servicio adecuado.

$$J_{c+} \in \{J_c \mid J_{c+} = J_{i, i+1} \mid l[J_{i, i+1}]_1 > l[J_{j, j+1}]_1; \forall j \neq i; J_{c+} > J_c$$

$$J_c = \{J_c \in \{J_c \mid J_c = J_{i+1, i} \mid l[J_{i+1, i}]_1 > l[J_{j+1, j}]_1; \forall j \neq i; J_c > J_{c+}$$

Si los valores de  $J_{c+}$  y  $J_c$  son iguales, se puede elegir a cualquiera de ellos como  $J_c$ .

### B-1-2) Localización del servidor que atienda a $J_c$

Una vez localizado el arco crítico, se propone que sea cubierto desde el nodo más lejano posible, de tal manera que se cubre una mayor parte de la red que si se ubica en una posición más cercana al arco crítico.

Como es natural, el lugar en el que ha de ubicarse ese primer servicio depende del sentido del arco crítico.

#### B-1-2-A) Si $J_c = J_{c+}$ ; $J_{c+} > J_c$ .

En este caso se debe cubrir a  $J_c$  por la izquierda, pues puede darse el caso de que desde la derecha sea imposible cubrirle. De esta manera, el primer servicio se localiza en  $i' = i - k$

$$i' = i - k \mid \sum_{k=0}^{i-1} I[J_{i-k+i+1-k}] \leq I_{ct} ; \quad k = k_j \mid k_j |_0 > k_j |_i ; \forall j \neq i$$

k: contador de posición inicial

#### B-1-2-B) Si $J_c = J_{c-}$ ; $J_{c-} > J_c$ .

En este caso se debe cubrir a  $J_c$  por la derecha, pues puede darse el caso de que desde la izquierda sea imposible cubrirle. De esta manera, el primer servicio se localiza en  $i' = i + k + 1$

$$i' = i + k + 1 \mid \sum_{k=0}^{n-i} I[J_{i+k+1-n+k}] \leq I_{ct} ; \quad k = k_j \mid k_j |_0 > k_j |_i ; \forall j \neq i$$

k: contador de posición inicial

### B-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por el servidor recién ubicado

Además de la capacidad de atender a  $J_c$ , el nuevo servicio puede contar con la capacidad de atender a uno o más arcos distintos de dicho arco crítico, dependiendo de los lugares a los que pueda accederse antes de que el tiempo crítico transcurra, partiendo desde la posición del mencionado servicio.

Se verifica la cobertura que de la red se hace, considerando los cuatro posibles tipos de recorrido que son factibles luego de que se parte de un nodo cualquiera, exceptuando los nodos de los extremos (1 y n). Fuera de esos nodos de los extremos, para los cuales solo se tienen dos opciones, se puede recorrer la red:

- I. En sentido positivo
- II. En sentido negativo
- III. En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo
- IV. En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo

**B-1-3-A) Si  $J_c = J_{c+}$ ;  $J_{c+} > J_c$ .**

**B-1-3-A-I) En sentido positivo**

Se sabe que en sentido positivo se cubre desde  $i' = i-k$  hasta  $i+1$ .

Se llama  $J_{A-I} = \{J_{i-k \rightarrow i-k+1}, J_{i-k+1 \rightarrow i-k+2}, \dots, J_{i-1 \rightarrow i}, J_{i \rightarrow i+1}\}$  al conjunto de arcos que son necesarios para ir en sentido estrictamente positivo de  $i' = i-k$  a  $i+1$  y se les marca.

**B-1-3-A-II) En sentido negativo**

Se verifica el avance que se puede tener en sentido negativo.

Probar para cada  $w = w_i, |w_i|_0 > |w_j|_0; \forall j \neq i$  **w: prueba de cobertura**

si:

$$\sum_{w=1}^{i-1} I[J_{i,k,w+1-i,k+w}] \leq I_{\alpha}$$

Se llama  $J_{A-II}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**B-1-3-A-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $J_{A-I}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido negativo, dado que se tuvieron avances en sentido positivo, es decir:

Probar para cada  $w = w_j \mid w_j |_0 > w_j |_1; \forall j \neq i$        $w$ : prueba de cobertura  
 si:

$$\sum_{w=1}^{i-1} I[J_{i,k+w-1-i,k+w}] + I[J_{i,k+w-i,k+w-1}] |_{w=1} \leq I_{\alpha}$$

Se llama  $J_{A-III}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**B-1-3-A-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $J_{A-II}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido positivo, dado que se tuvieron avances en sentido negativo, es decir:

Probar para cada  $w = w |_1$ ;       $w$ : prueba de cobertura



si:

$$\sum_{u=1}^{i-k-1} I[J_{i-k-w+1-i+k-w}] + I[J_{i-k-w-i+k-w+1}]|_{w=1} \leq I_{ct}$$

Se llama  $J_{A-IV}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**B-1-3-B) Si  $J_c = J_{c-}$  ;  $J_{c-} > J_{c+}$**

**B-1-3-B-I) En sentido positivo**

Se verifica el avance que se puede tener en sentido positivo

Probar para cada  $w = w_i$   $w_i |_0 > w_j |_0$  ;  $\forall j \neq i$  ;  $w$ : prueba de cobertura

si:

$$\sum_{w=1}^{i-k-1} I[J_{i+k-w-i+k+w+1}] \leq I_{ct}$$

Se llama  $J_{B-I}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**B-1-3-B-II) En sentido negativo**

Se sabe que en sentido negativo se cubre desde  $i' = i+k+1$  hasta  $i$

Se llama  $J_{B-II} = \{J_{i+k+1-i+k}, J_{i+k-i+k-1}, \dots, J_{i+2-i+1}, J_{i+1-i}\}$  al conjunto de arcos que son necesarios para ir en sentido estrictamente negativo de  $i' = i+k+1$  a  $i$  y se les marca.

**B-1-3-B-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $J_{B-1}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido negativo, dado que se tuvieron avances en sentido positivo, es decir:

Probar para cada  $w = w_i \mid w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i;$   $w$ : prueba de cobertura  
si:

$$\sum_{w=1}^{n-i-1} I[J_{i+k+w-i+k+w+1}] + I[J_{i+k+w+1-i+k+w}]|_{w=1} \leq I_{ct}$$

Se llama  $J_{B-III}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

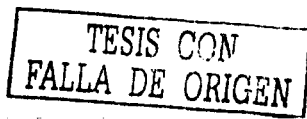
**B-1-3-B-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $J_{B-II}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido positivo, dado que se tuvieron avances en sentido negativo, es decir:

Probar para cada  $w = w_i \mid w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i;$   $w$ : prueba de cobertura  
si:

$$\sum_{w=1}^{i+1} I[J_{i+k+1-i+k+w+1}] + I[J_{i+k+w+1-i+k+1}]|_{w=1} \leq I_{ct}$$

Se llama  $J_{B-IV}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.



#### B-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración

Sea  $L[\mathbf{J}]$  la longitud total de los arcos de la red.

$$L[\mathbf{J}] = \sum_{i=1}^{n-1} l[\mathbf{J}_{i \rightarrow i+1}] + \sum_{i=1}^{n-1} l[\mathbf{J}_{i+1 \rightarrow i}]$$

Sea  $\mathbf{J}_\alpha$  el conjunto de los arcos cubiertos en cada iteración incluyendo las anteriores.

$$\mathbf{J}_\alpha = \sum_{\alpha=1}^m \mathbf{J}_\alpha; \text{ m: número de iteración}$$

En este caso  $\mathbf{J}_\alpha = \mathbf{J}_1$

$$\mathbf{J}_{A-I} \cup \mathbf{J}_{A-II} \cup \mathbf{J}_{A-III} \cup \mathbf{J}_{A-IV}; J_c = J_{c+}; J_{c+} > J_c.$$

$\mathbf{J}_1 =$

$$\mathbf{J}_{B-I} \cup \mathbf{J}_{B-II} \cup \mathbf{J}_{B-III} \cup \mathbf{J}_{B-IV}; J_c = J_{c+}; J_{c+} > J_c.$$

Y sea  $L_{c\alpha} = l[\mathbf{J}_\alpha]$  la longitud total de los arcos cubiertos hasta cada iteración:

En este caso:

$$l[\mathbf{J}_{A-I}] + l[\mathbf{J}_{A-II}] + l[\mathbf{J}_{A-III}] + l[\mathbf{J}_{A-IV}]; J_c = J_{c+}; J_{c+} > J_c.$$

$L_{c\alpha} =$

$$l[\mathbf{J}_{B-I}] + l[\mathbf{J}_{B-II}] + l[\mathbf{J}_{B-III}] + l[\mathbf{J}_{B-IV}]; J_c = J_{c+}; J_{c+} > J_c.$$

Se prueba ahora si se debe hacer otra iteración en caso de que no estén cubiertos ya todos los arcos de la red.

$$\alpha = \alpha + 1; L > L_{cr}$$

$$\alpha =$$

$$\alpha; L \leq L_{cr}$$

Si  $\alpha = \alpha + 1$ , se procede hacia C) sustituyendo el nuevo valor de  $\alpha$ . En caso contrario, se da por finalizado el procedimiento y por resuelto el problema.

### C) Proceso iterativo

Si no ha quedado cubierta la totalidad de los arcos de la red, el objetivo es por obviedad cubrir al resto de arcos no atendidos. Esto puede realizarse mediante una serie de iteraciones iguales entre sí y que finalizan cuando ya se haya cubierto de forma adecuada toda la red.

#### C-1) m-ésima iteración (igual a las subsecuentes)

$$\alpha = m; \quad m: \text{número de iteración}$$

##### C-1-1) Búsqueda de los arcos a cubrir $J_{d\ der}$ y $J_{d\ izq}$ (arcos prioritarios)

La diferencia más substancial entre la primera iteración y las iteraciones del tipo que ahora se describen, radica en el hecho de que ahora se cubren uno o dos arcos prioritarios con uno o dos servicios, en lugar de uno y solo uno como en el caso de la iteración inicial.

Los arcos que son más importantes en estas iteraciones, son aquellos no cubiertos y menos lejanos del arco crítico de la primera iteración. Con esto se garantiza que la red se cubre en su totalidad partiendo de una parte central y hacia los extremos, o bien, de un extremo a otro.

El que haya uno o dos arcos a cubrir en estas iteraciones depende de la cobertura de la iteración anterior: si se ha llegado a cubrir todo un extremo de la red (izquierdo o

derecho), tomando como referencia al arco crítico, solo ha de ubicarse un servicio que atienda por el lado contrario. En caso de no haber cubierto totalmente ninguno de los dos lados de la red, se debe dar localización a dos servidores, uno por la izquierda y uno por la derecha.

De tal manera que se definen dos arcos prioritarios: uno por la izquierda ( $J_{d\ der}$ ) y otro por la derecha ( $J_{d\ der}$ ), que pueden ser en conjunto ya sea arcos de sentido positivo y/o negativo.

### C-1-1-DER) Arco prioritario por la derecha

$$J_{d\ der+} \in \mathcal{J}_+ | J_{j \rightarrow j+1} |_1 | \wedge [J_{j \rightarrow j+1}; J_{i \rightarrow i+1}] |_1 < \wedge [J_{h \rightarrow h+1}; J_{i \rightarrow i+1}] |_1 ;$$

$$\forall j \neq h; h, j > i; J_{j \rightarrow j+1} \in \mathcal{J}_a$$

$J_{d\ der} =$

$$J_{d\ der-} \in \mathcal{J}_- | J_{j+1 \rightarrow j} |_1 | \wedge [J_{j+1 \rightarrow j}; J_{i+1 \rightarrow i}] |_1 < \wedge [J_{h+1 \rightarrow h}; J_{i+1 \rightarrow i}] |_1 ;$$

$$\forall j \neq h; h, j \geq i; J_{j+1 \rightarrow j} \in \mathcal{J}_a ; \wedge [J_{i+1 \rightarrow j}; J_c] < \wedge [J_{j+1 \rightarrow j}; J_c]$$

### C-1-1-IZQ) Arco prioritario por la izquierda

$$J_{d\ izq+} \in \mathcal{J}_+ | J_{j \rightarrow j+1} |_1 | \wedge [J_{j \rightarrow j+1}; J_{i \rightarrow i+1}] |_1 < \wedge [J_{h \rightarrow h+1}; J_{i \rightarrow i+1}] |_1 ;$$

$$\forall j \neq h; h, j < i; J_{j \rightarrow j+1} \in \mathcal{J}_a ; \wedge [J_{j \rightarrow j+1}; J_c] < \wedge [J_{j+1 \rightarrow j}; J_c]$$

$J_{d\ izq} =$

$$J_{d\ izq-} \in \mathcal{J}_- | J_{j+1 \rightarrow j} |_1 | | \wedge [J_{j+1 \rightarrow j}; J_{i+1 \rightarrow i}] |_1 < \wedge [J_{h+1 \rightarrow h}; J_{i+1 \rightarrow i}] |_1 ;$$

$$\forall j \neq h; h, j \leq i; J_{j+1 \rightarrow j} \in \mathcal{J}_a$$

Nótese que en cada caso, tienen distinta prioridad los arcos negativos o positivos, pues dos arcos por la izquierda, o dos arcos por la derecha pueden tener valores idénticos de lejanía con respecto al arco  $J_c$ , pero dada la forma en que se cubren los arcos prioritarios por la derecha y por la izquierda, es necesario que tengan distinta importancia y sean prioritarios los arcos positivos o los negativos respectivamente según el lado del que se trate.

### C-1-2) Localización de los servidores que atiendan a los arcos prioritarios

Una vez localizados los arcos prioritarios, se propone que sean cubiertos desde los nodos más lejanos posibles a cada uno de ellos y que tengan tal capacidad de cubrirlos, de tal manera que se cubra una mayor parte de la red que en el caso de ubicar los servicios en posiciones más cercana a tales arcos.

En este caso, los lado desde el que se cubren los arcos prioritarios no dependen del sentido de cada arco prioritario, sino del lado en el que se ubican con respecto al arco crítico. Sin embargo, los sentidos de dichos arcos son importantes en cuanto a la distancia a la que debe estar el nodo en que se ubique cada servidor.

#### C-1-2-DER) Por la derecha: $J_{d\ der}$

En este caso se debe cubrir a  $J_{d\ der}$  por la derecha, con el fin de reducir al mínimo la duplicidad de coberturas.

##### C-1-2-DER-A) Por la derecha y además $J_{d\ der} = J_{d\ der+}$

De esta manera, el primer servicio se localiza en  $j' = j + k + 1$

$$j' = j+k+1 \mid \sum_{i=0}^{n-1} l[J_{j+k+1 \rightarrow j+k}] + l[J_{j \rightarrow j+1}] \leq l_{ct}; \quad k = k_1 \mid k_1 \mid_0 > k_1 \mid_0; \forall j \neq i$$

k: contador de posición

##### C-1-2-DER-B) Por la derecha y además $J_{d\ der} = J_{d\ der-}$

De esta manera, el primer servicio se localiza en  $j' = j + k + 1$

$$j' = j+k+1 \mid \sum_{i=0}^{n-1} l[J_{j+k+1 \rightarrow j+k}] \leq l_{ct}; \quad k = k_1 \mid k_1 \mid_0 > k_1 \mid_0; \forall j \neq i$$

k: contador de posición

**C-1-2-IZQ) Por la izquierda:  $J_{d\ izq}$**

En este caso se debe cubrir a  $J_{d\ izq}$  por la izquierda, con el fin de reducir al mínimo la duplicidad de coberturas.

**C-1-2-IZQ-A) Por la izquierda y además  $J_{d\ izq} = J_{d\ izq+}$**

El servicio se debe localizar en  $j' = j - k$

$$j' = j - k \mid \sum_{k=0}^{j-1} l[J_{j-k-j+1-k}] \leq l_{ct}; \quad k = k_1 \mid k_1 \mid_0 > k_j \mid_0; \quad \forall j \neq i$$

k: contador de posición

**C-1-2-IZQ-B) Por la izquierda y además  $J_{d\ izq} = J_{d\ izq-}$**

El servicio se debe localizar en  $j' = j - k$

$$j' = j - k \mid \sum_{k=0}^{j-1} [l[J_{j-k-j+1-k}] + l[J_{j+1-j}]] \leq l_{ct}; \quad k = k_1 \mid k_1 \mid_0 > k_j \mid_0; \quad \forall j \neq i$$

k: contador deposición

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**C-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por los servidores recién ubicados**

Además de la capacidad de atender a  $J_{d\ der}$  y a  $J_{d\ izq}$ , los nuevos servicios pueden contar con la capacidad de atender a uno o más arcos distintos de dichos arcos prioritarios, dependiendo de los lugares a los que pueda accederse antes de que el tiempo crítico transcurra, partiendo desde la posición en que se localizan tales servicios.

Se verifica la cobertura que de la red se hace, considerando los cuatro posibles tipos de recorrido que son factibles luego de que se parte de un nodo cualquiera,

exceptuando los nodos de los extremos (1 y n). Fuera de esos nodos de los extremos, para los cuales solo se tienen dos opciones, se puede recorrer la red:

- I. En sentido positivo
- II. En sentido negativo
- III. En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo
- IV. En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo

#### **C-1-3-IZQ) Por la izquierda: $J_{d_{izq}}$**

#### **C-1-3-IZQ-I) En sentido positivo**

Se trata de una cobertura en la cual; dados el criterio de selección del arco prioritario por la izquierda mediante el empleo de la lejanía y la dádiva de prioridad a los arcos negativos sobre los positivos, así como por la forma en que se ha cubierto a  $J_2$ ; se conoce siempre el arco positivo más cercano a  $J_2$  cubierto en esta m-ésima iteración, es decir, hasta donde se llega avanzando en sentido positivo. En el caso particular de que  $J_{d_{izq}} = J_{d_{izq}}$ , puede presentarse que se pueda avanzar más allá de  $j+1$  en sentido positivo, sin embargo, no tiene mayor relevancia para fines del presente estudio, ya que los arcos sobre los que se avanza en ese caso hipotético son arcos previamente cubiertos por otro servidor. De tal manera que:

Se sabe que en sentido positivo se cubre desde  $j' = j-k$  hasta  $j+1$ .

Se llama  $J_{IZQ-I} = \{J_{j-k, j-1}, J_{j-k+1, j}, J_{j-k+2, j+1}, \dots, J_{j-1, j}, J_{j, j+1}\}$  al conjunto de arcos que son necesarios para ir en sentido estrictamente positivo de  $j' = j-k$  a  $j+1$  y se les marca.

#### **C-1-3-IZQ-II) En sentido negativo**

Se verifica el avance que se puede tener en sentido negativo.

Probar para cada  $w = w_i \mid w_i > w_j \mid_0; \forall j \neq i; w$ : prueba de cobertura



si:

$$\sum_{w=1}^{i-1} l[J_{j,k,w+1 \rightarrow j,k,w}] \leq l_{\alpha}$$

Se llama  $J_{IZQ-II}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

### **C-1-3-IZQ-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $J_{IZQ-I}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido negativo, dado que se tuvieron avances en sentido positivo, es decir:

Probar para cada  $w = w_i | w_i > w_j |_0 ; \forall j \neq i ; w$ : prueba de cobertura

si:

$$\sum_{w=1}^{i-1} l[J_{j,k,w-1 \rightarrow j,k+w}] + l[J_{j,k+w \rightarrow j,k+w-1}] |_{w=1} \leq l_{\alpha}$$

Se llama  $J_{A-III}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

La única excepción a la prueba anterior es el arco  $J_{j+1 \rightarrow j}$  si se presenta que  $J_{d_{IZQ}} = J_{2,IZQ}$ , pues se sabe que dicho arco ya es atendido por el servidor.

### **C-1-3-IZQ-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $\mathcal{J}_{IQ-II}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido positivo, dado que se tuvieron avances en sentido negativo, es decir:

Probar para cada  $w = w_i \mid w_i |_0 > w_j |_0 ; \forall j \neq i ; \quad w$ : prueba de cobertura

si:

$$\sum_{w=1}^{j-t-1} l[J_{j-k-w+1-j-k-w}] + l[J_{j-k-w-j-k-w+1}] |_{w=1} \leq l_{ct}$$

Se llama  $\mathcal{J}_{IQ-IV}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**C-1-3-DER) Por la derecha:  $J_d = J_{d\ der}$**

**C-1-3-DER-I) En sentido positivo**

Se verifica el avance que se puede tener en sentido positivo

Probar para cada  $w = w_i \mid w_i |_0 > w_j |_0 ; \forall j \neq i ; \quad w$ : prueba de cobertura

si:

$$\sum_{w=1}^{n-j-t-1} l[J_{j+k+w-j+k+w+1}] \leq l_{ct}$$

Se llama  $\mathcal{J}_{DER-I}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

**C-1-3-DER-II) En sentido negativo**

Se trata de una cobertura en la cual; dados el criterio de selección del arco prioritario por la derecha mediante el empleo de la lejanía y la dádiva de prioridad a los arcos positivos sobre los negativos, así como por la forma en que se ha cubierto a  $J_c$ ; se conoce siempre el arco negativo más cercano a  $J_c$  cubierto en esta  $m$ -ésima iteración, es decir, hasta donde se llega avanzando en sentido negativo. En el caso particular de que  $J_{d\ der} = J_{d\ der+}$ , puede presentarse que se pueda avanzar más allá de  $j-1$  en sentido negativo, sin embargo ese hecho no tiene mayor relevancia para fines del presente estudio, ya que los arcos sobre los que se avanzaría en ese caso hipotético son arcos previamente cubiertos por otro servidor. De tal manera que:

Se sabe que en sentido negativo se cubre desde  $j' = j+k+1$  hasta  $j$

Se llama  $\mathbf{J}_{DER-II} = \{J_{j+k+1-j+k}, J_{j+k-j+k-1}, \dots, J_{j+2-j+1}, J_{j+1-j}\}$  al conjunto de arcos que son necesarios para ir en sentido estrictamente negativo de  $j' = j+k$  a  $j-1$  y se les marca.

### **C-1-3-DER-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $\mathbf{J}_{DER-I}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido negativo, dado que se tuvieron avances en sentido positivo, es decir:

Probar para cada  $w = w_1 \mid w_1 |_0 > w_j |_0 ; \forall j \neq i ; \quad w$ : prueba de cobertura  
si:

$$\sum_{w=1}^{n-j-k-1} l[J_{j+k+w-j+k+w+1}] + l[J_{j+k+w+1-j+k+w}] |_{w=1} \leq l_{cl}$$

Se llama  $\mathbf{J}_{DER-III}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

### C-1-3-DER-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo

Para aquellos arcos que regresan hacia el nodo del servidor, a partir de los nodos de destino de los arcos que pertenecen a  $\mathcal{J}_{\text{DER-III}}$ , se debe verificar la posibilidad de regresar en sentido positivo, dado que se tuvieron avances en sentido negativo, es decir:

Probar para cada  $w = w_i | w_i |_0 > w_j |_0 ; \forall j \neq i ; w : \text{prueba de cobertura}$

si:

$$\sum_{w=1}^{i+1} \{ I[J_{j+k-w+1-j+k-w}] + I[J_{j+k-w-j+k-w+1}] \} w=1 \leq l_{ct}$$

Se llama  $\mathcal{J}_{\text{DER-IV}}$  al conjunto de arcos para los cuales lo anterior es verdadero y se les marca.

La única excepción a la prueba anterior es el arco  $J_{j, j+1}$  si se presenta que  $\mathcal{J}_{\text{der}} = \mathcal{J}_{\text{der}+r}$  pues se sabe que dicho arco ya es atendido por el servidor.

### C-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración

Sea  $L[\mathcal{J}]$  la longitud total de los arcos de la red.

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} l[J_{i, i+1}] + \sum_{i=1}^{n-1} l[J_{i+1, i}]$$

Sea  $\mathcal{J}_a$  el conjunto de los arcos cubiertos en cada iteración incluyendo las anteriores.

$$\mathcal{J}_a = \sum_{a=1}^m \mathcal{J}_a ; m : \text{número de iteración}$$

En este caso  $J_{\alpha} = J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_{m-1} \cup J_m$

y:

$$J_m = J_{1ZQ-I} \cup J_{1ZQ-II} \cup J_{1ZQ-III} \cup J_{1ZQ-IV} \cup J_{DER-I} \cup J_{DER-II} \cup J_{DER-III} \\ \cup J_{DER-IV}$$

Y sea  $L_{\alpha} = l[J_{\alpha}]$  la longitud total de los arcos cubiertos hasta cada iteración:

Se prueba ahora si se debe hacer otra iteración en caso de que no estén cubiertos ya todos los arcos de la red.

$$\alpha = \alpha + 1; L > L_{\alpha}$$

$\alpha =$

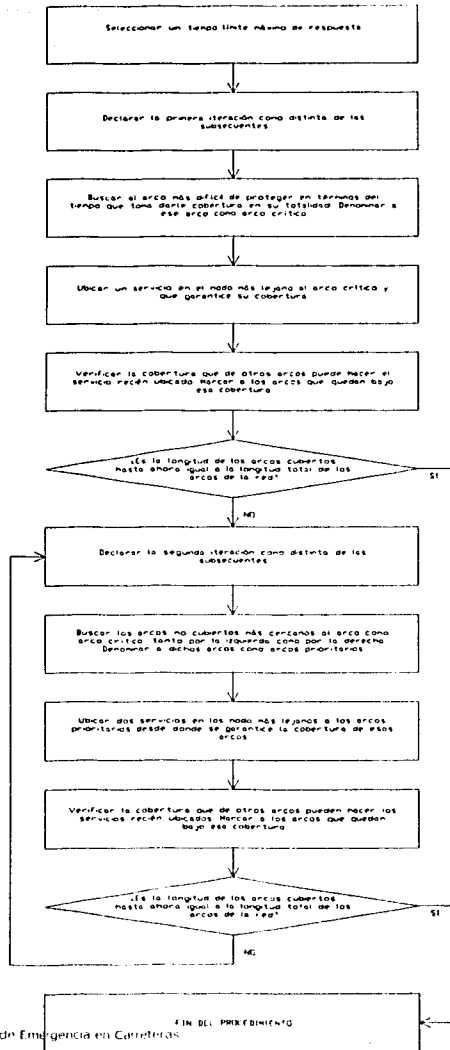
$$\alpha; L \leq L_{\alpha}$$

Si  $\alpha = \alpha + 1$ , se procede hacia C-1) sustituyendo el nuevo valor de  $\alpha$ . En caso contrario, se da por finalizado el procedimiento y por resuelto el problema.

Con el fin de facilitar la comprensión del algoritmo anterior, se presenta en la figura 4.3 a modo de resumen, el diagrama de flujo de dicho algoritmo y en donde se pueden observar las 3 fases (A, B y C), que de manera general componen el proceso del algoritmo. En la misma figura 4.3 además se enumeran los pasos de los que cada fase del procedimiento consta y de la misma manera, se les presenta acordes con la nomenclatura utilizada en los párrafos anteriores.

#### IV. 3 Ejemplo de aplicación del algoritmo

A continuación se presenta un ejemplo de una corrida del algoritmo para que el mismo pueda comprenderse con mayor facilidad.



Localización de Servicios de Emergencia en Carreteras

FIGURA 4.3 Diagrama de flujo del algoritmo

- Ejemplo de aplicación del algoritmo (en el caso más crítico de la autopista México – Querétaro)

### A) Preparación del algoritmo

#### A-1) Definición del tiempo límite máximo de respuesta

Considerando la descripción física de la carretera, según lo que se presenta en II.2, se puede generar la siguiente tabla:

Nodo	Kilometraje	Kilometraje en decimales	Arco	Longitud [km]	Arco	Longitud [km]
1	43+000	43.000				
2	50+100	50.100	J <sub>1,2</sub>	7.100	J <sub>2,1</sub>	7.100
3	56+180	56.180	J <sub>2,3</sub>	6.080	J <sub>3,2</sub>	6.080
4	69+360	69.360	J <sub>3,4</sub>	12.790	J <sub>4,3</sub>	13.180
5	83+750	83.750	J <sub>4,5</sub>	14.460	J <sub>5,4</sub>	14.390
6	99+300	99.300	J <sub>5,6</sub>	15.550	J <sub>6,5</sub>	15.550
7	107+000	107.000	J <sub>6,7</sub>	7.700	J <sub>7,6</sub>	7.700
8	115+000	115.000	J <sub>7,8</sub>	8.000	J <sub>8,7</sub>	8.000
9	148+500	148.500	J <sub>8,9</sub>	33.500	J <sub>9,8</sub>	33.500
10	151+800	151.800	J <sub>9,10</sub>	3.300	J <sub>10,9</sub>	3.390
11	156+100	156.100	J <sub>10,11</sub>	4.300	J <sub>11,10</sub>	4.300
12	159+100	159.100	J <sub>11,12</sub>	3.150	J <sub>12,11</sub>	3.000
13	164+100	164.100	J <sub>12,13</sub>	5.000	J <sub>13,12</sub>	5.140
14	175+450	175.450	J <sub>13,14</sub>	11.580	J <sub>14,13</sub>	11.350
15	180+250	180.250	J <sub>14,15</sub>	4.800	J <sub>15,14</sub>	4.800
16	187+200	187.200	J <sub>15,16</sub>	6.950	J <sub>16,15</sub>	6.950
17	197+850	197.850	J <sub>16,17</sub>	10.650	J <sub>17,16</sub>	10.650
18	198+000	198.000	J <sub>17,18</sub>	0.150	J <sub>18,17</sub>	0.150
19	201+800	201.800	J <sub>18,19</sub>	3.800	J <sub>19,18</sub>	3.800
20	212+000	212.000	J <sub>19,20</sub>	10.200	J <sub>20,19</sub>	10.200

TABLA 4.1 Nodos y longitud de los arcos de la autopista México - Querétaro

Se puede observar que el arco más largo mide 33.5 km, de tal manera que recorrerle a una velocidad  $v = 100$  [km/h] toma 20.1 [min], así que es posible considerar un tiempo crítico  $t_{ct} = 20.1$  [min], lo cual además queda apenas dentro de lo que se sugiere para el diseño de los EMS que actúan en un medio rural.

$$l_{ct} = t_{ct} / v = 33.5 \text{ km}$$

**A-2) y A-3) No es necesario describirlos en el ejemplo, basta con conocerlos**

**B) Inicialización del algoritmo.**

**B-1) Primera iteración**

$$\alpha = 1$$

**B-1-1) Búsqueda del arco crítico**

$$J_{c+} = J_{i \rightarrow i+1} \mid l[J_{i \rightarrow i+1}]_1 > l[J_{j \rightarrow j+1}]_1 ; \forall j \neq i; J_{c+} > J_c$$

$$J_{c+} = J_{8 \rightarrow 9} \mid l[J_{8 \rightarrow 9}] > l[J_{j \rightarrow j+1}]_1 ; \forall j \neq 8; J_{c+} = J_c$$

$$J_{c-} = J_{i+1 \rightarrow i} \mid l[J_{i+1 \rightarrow i}]_1 > l[J_{j+1 \rightarrow j}]_1 ; \forall j \neq i; J_{c-} > J_{c+}$$

$$J_{c-} = J_{9 \rightarrow 8} \mid l[J_{9 \rightarrow 8}] > l[J_{j+1 \rightarrow j}]_1 ; \forall j \neq 8; J_{c-} = J_{c+}$$

En este caso, los valores de  $J_{c+}$  y  $J_{c-}$  son iguales, por lo que se propone que  $J_c = J_{c+} = J_{8 \rightarrow 9}$

**B-1-2) Localización del servidor que atienda a  $J_c$**

**B-1-2-A)**



$$i' = 8 - k \mid \sum_{k=0}^7 I[J_{8-k, 9-k}] \leq 33.5; \quad k = k_j \mid k_j|_0 > k_j|_1; \forall j \neq i$$

$k$ : contador de posición inicial

Lo anterior se cumple únicamente para  $k_0$ , así pues la localización del primer servicio es en:

$$i' = 8 - 0 = 8$$

### **B-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por el servidor recién ubicado**

#### **B-1-3-A)**

##### **B-1-3-A-I) En sentido positivo**

Se marca a los arcos de  $\mathbf{J}_{A-1}$

$$\mathbf{J}_{A-1} = \{J_{8-9}\}$$

##### **B-1-3-A-II) En sentido negativo**

$$\sum_{w=1}^7 I[J_{8-w+1, 8-w}] \leq 33.5 \quad w = w_j \mid w_j|_0 > w_j|_1; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $w_3$ , así pues se marcan los arcos de  $\mathbf{J}_{A-11}$

$$\mathbf{J}_{A-11} = \{J_{8-7}, J_{7-6}, J_{6-5}\}$$

##### **B-1-3-A-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^1 l[J_{8+w,1-8+w}] + l[J_{8+w-8,w-1}]|_{w=1} \leq 33.5$$

Lo anterior no se cumple para ningún valor de  $w$ , así pues:

$$J_{A-III} = \{\emptyset\}$$

**B-1-3-A-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

$$\sum_{w=1}^7 l[J_{8+w,1-8+w}] + l[J_{8-w-8,w+1}]|_{w=1} \leq 33.5$$

Lo anterior se cumple para  $w_2$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{A-IV}$

$$J_{A-IV} = \{J_{7-8}, J_{6-7}\}$$

**B-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración**

$$L[J] = \sum_{i=1}^{19} l[J_{i-1,i}] + \sum_{i=1}^{19} l[J_{i+1-i}] = 338.29 \text{ km}$$

En este caso  $J_{\alpha} = J_1 = J_{A-1} \cup J_{A-II} \cup J_{A-III} \cup J_{A-IV} = \{J_{8-7}, J_{7-6}, J_{6-5}, J_{7-8}, J_{6-7}, J_{8-9}\}$

$$L_{\alpha} = l[J_{\alpha}] = 80.45 \text{ km} < L[J] = 338.29 \text{ km}$$

$\alpha = \alpha + 1 = 2$  y se procede a C)

**C) Proceso iterativo**

### C-1) segunda iteración

$$\alpha = 2$$

#### **C-1-1) Búsqueda de los arcos prioritarios**

##### **C-1-1-1-1-1) Arco prioritario por la derecha**

$$\Lambda[J_{9 \rightarrow 8}; J_{8 \rightarrow 9}] = |8-8| = 0$$

$$J_{d \text{ der}} = J_{d \text{ der}} \in \mathcal{J} \mid J_{9 \rightarrow 8} \mid \Lambda[J_{9 \rightarrow 8}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{h+1 \rightarrow h}; J_{8 \rightarrow 9}] \mid 1 ; \\ \forall h \neq 8; h, 8 \geq i; J_{9 \rightarrow 8} \notin \mathcal{J}_\alpha; \Lambda[J_{9 \rightarrow 8}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{9 \rightarrow 10}; J_{8 \rightarrow 9}]$$

##### **C-1-1-1-1-2) Arco prioritario por la izquierda**

$$\Lambda[J_{5 \rightarrow 6}; J_{8 \rightarrow 9}] = |8-5| = 3$$

$$J_{d \text{ izq}} = J_{d \text{ izq}} \in \mathcal{J} \mid J_{5 \rightarrow 6} \mid \Lambda[J_{5 \rightarrow 6}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{h \rightarrow h+1}; J_{8 \rightarrow 9}] \mid 1 ; \\ \forall h \neq 7; h, 7 < i; J_{5 \rightarrow 6} \notin \mathcal{J}_\alpha; \Lambda[J_{5 \rightarrow 6}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{5 \rightarrow 4}; J_{8 \rightarrow 9}]$$

#### **C-1-2) Localización de los servidores que atiendan a los arcos prioritarios**

##### **C-1-2-1-1) Por la derecha: $J_{d \text{ der}}$**

##### **C-1-2-1-2) Por la derecha y además $J_{d \text{ der}} = J_{d \text{ der}}$**

$$j' = j+k+1 \mid \sum_{i=0}^{12} t[J_{8+k+1 \rightarrow 8+k}] \leq 33.5; k = k_1 \mid k_1 > k_1 \mid_0; \forall i \neq j$$

Lo anterior se cumple únicamente para  $k_0$ , así pues la localización del servicio de la derecha es en:

$$j' = 8+0+1 = 9$$

**C-1-2-IZQ) Por la izquierda:  $J_{d\ izq}$**

**C-1-2-IZQ-A) Por la izquierda y además  $J_{d\ izq} = J_{d\ izq+}$**

El servicio se debe localizar en  $j' = j - k$

$$j' = j - k \mid \sum_{k=0}^j I[J_{5-k..6-k}] \leq 33.5; \quad k = k_1 \mid k_1|_0 > k_j|_0; \forall i \neq j$$

Lo anterior se cumple para  $k_1$ , así pues la localización del servicio de la izquierda es en:

$$j' = 5 - 1 = 4$$

**C-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por los servidores recién ubicados**

**C-1-3-IZQ) Por la izquierda:  $J_{d\ izq}$**

**C-1-3-IZQ-I) En sentido positivo**

Se marca a los arcos de  $J_{IZQ-1}$

$$J_{IZQ-1} = \{J_{4..5}, J_{5..6}\}$$

**C-1-3-IZQ-II) En sentido negativo**

$$\sum_{w=1}^j I[J_{4-w+1..4-w}] \leq 33.55; \quad w = w_1 \mid w_1|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $w_3$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{IZQ-II}$

$$J_{IZQ-II} = \{J_{4 \rightarrow 3}, J_{3 \rightarrow 2}, J_{2 \rightarrow 1}\}$$

**C-1-3-IZQ-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^2 l[J_{4+w-1 \rightarrow 4+w}] + l[J_{4+w-1 \rightarrow w-1}]|_{w=1} \leq 33.5; \quad w = w_i | w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $W_2$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{IZQ-III}$

$$J_{IZQ-III} = \{J_{6 \rightarrow 5}, J_{5 \rightarrow 4}\}$$

**C-1-3-IZQ-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

$$\sum_{w=1}^3 l[J_{4+w-1 \rightarrow 4+w}] + l[J_{4+w-1 \rightarrow w+1}]|_{w=1} \leq 33.5; \quad w = w_i | w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $W_3$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{IZQ-IV}$

$$J_{IZQ-IV} = \{J_{3 \rightarrow 4}, J_{2 \rightarrow 3}, J_{1 \rightarrow 2}\}$$

**C-1-3-DER) Por la derecha:  $J_d = J_{d \text{ der}}$**

**C-1-3-DER-I) En sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^{11} l[J_{8+w-8 \rightarrow w+1}] \leq 33.5; \quad w = w_i | w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $W_6$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{DER-I}$

$$J_{\text{DER-I}} = \{J_{9 \rightarrow 10}, J_{10 \rightarrow 11}, J_{11 \rightarrow 12}, J_{12 \rightarrow 13}, J_{13 \rightarrow 14}, J_{14 \rightarrow 15}\}$$

### C-1-3-DER-II) En sentido negativo

Se marca a los arcos de  $J_{\text{DER-II}}$

$$J_{\text{DER-II}} = \{J_{9 \rightarrow 8}\}$$

C-1-3-DER-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo

$$\sum_{w=1}^{11} t[J_{8+w \rightarrow 8+w+1}] + t[J_{8+w+1 \rightarrow 8+w}] |_{w=1} \leq 33.5; w = w_j | w_j |_0 > w_j |_0; \forall j \neq 1$$

Lo anterior se cumple para  $W_4$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{\text{DER-III}}$

$$J_{\text{DER-III}} = \{J_{10 \rightarrow 9}, J_{11 \rightarrow 10}, J_{12 \rightarrow 11}, J_{13 \rightarrow 12}\}$$

C-1-3-DER-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo

$$\sum_{w=1}^1 t[J_{8+1 \rightarrow 8-w+1}] + t[J_{8-w+1 \rightarrow 8+1}] |_{w=1} \leq 33.5; w = w_j | w_j |_0 > w_j |_0; \forall j \neq 1$$

Lo anterior no se cumple para ningún valor de  $w$ , así pues:

$$J_{\text{IZQ-IV}} = \{\emptyset\}$$

C-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración

$$L[\mathbf{J}] = \sum_{r=1}^{19} l[J_{1 \rightarrow r+1}] + \sum_{r=1}^{12} l[J_{r+1 \rightarrow 1}] = 338.29 \text{ km}$$

En este caso  $\mathbf{J}_\alpha = \mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_1 \cup \mathbf{J}_2 = \{J_{8 \rightarrow 7}, J_{7 \rightarrow 6}, J_{6 \rightarrow 5}, J_{7 \rightarrow 8}, J_{6 \rightarrow 7}, J_{8 \rightarrow 9}, J_{4 \rightarrow 5}, J_{5 \rightarrow 6}, J_{4 \rightarrow 3}, J_{3 \rightarrow 2}, J_{2 \rightarrow 1}, J_{5 \rightarrow 4}, J_{3 \rightarrow 4}, J_{2 \rightarrow 3}, J_{1 \rightarrow 2}, J_{9 \rightarrow 10}, J_{10 \rightarrow 11}, J_{11 \rightarrow 12}, J_{12 \rightarrow 13}, J_{13 \rightarrow 14}, J_{14 \rightarrow 15}, J_{9 \rightarrow 8}, J_{10 \rightarrow 9}, J_{11 \rightarrow 10}, J_{12 \rightarrow 11}, J_{13 \rightarrow 12}\}$

$$L_{C_u} = l[\mathbf{J}_\alpha] = 258.64 \text{ km} < L[\mathbf{J}] = 338.29 \text{ km}$$

$\alpha = \alpha + 1 = 3$  y se procede nuevamente a C-1)

### C-1) tercera iteración

$$\alpha = 3$$

#### **C-1-1) Búsqueda de los arcos prioritarios**

##### **C-1-1-1-1) Arco prioritario por la derecha**

$$\Lambda[J_{14 \rightarrow 13}; J_{8 \rightarrow 9}] = |8-14| = 6$$

$$J_{d \text{ der}} = \{J_{h \rightarrow i} \in \mathbf{J}_\alpha \mid J_{14 \rightarrow 13} \mid \Lambda[J_{14 \rightarrow 13}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{h+1 \rightarrow h}; J_{8 \rightarrow 9}] \mid 1; \\ \forall h \neq 8; h, 8 \geq i; J_{14 \rightarrow 13} \notin \mathbf{J}_\alpha; \Lambda[J_{14 \rightarrow 13}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{15 \rightarrow 16}; J_{8 \rightarrow 9}]\}$$

##### **C-1-1-1-2) Arco prioritario por la izquierda**

$$J_{d \text{ izq}} = \{\emptyset\}$$

Ya no es necesario buscar un arco prioritario por la izquierda, dado que ya se cubrió todo el lado izquierdo.

**C-1-2) Localización de los servidores que atiendan a los arcos prioritarios**

**C-1-2-DER) Por la derecha:**  $J_{d \text{ der}}$

**C-1-2-DER-B) Por la derecha y además**  $J_{d \text{ der}} = J_{d \text{ der}}$ .

$$j' = j+k+1 \mid \sum_{k=0}^j l[J_{13+k+1 \rightarrow 13+k}] \leq 33.5; \quad k = k_1 \mid k_1 | 0 > k_1 | 0; \forall i \neq j$$

Lo anterior se cumple para  $k_2$ , así pues la localización del servicio de la derecha es en:

$$j' = 13+2+1 = 16$$

**C-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por el servidor recién ubicado**

**C-1-3-DER) Por la derecha:**  $J_d = J_{d \text{ der}}$

**C-1-3-DER-I) En sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^4 l[J_{15+w \rightarrow 15+w+1}] \leq 33.5; \quad w = w_1 \mid w_1 | 0 > w_1 | 0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $W_4$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{DER-1}$

$$J_{DER-1} = \{J_{16 \rightarrow 17}, J_{17 \rightarrow 18}, J_{18 \rightarrow 19}, J_{19 \rightarrow 20}\}$$

**C-1-3-DER-II) En sentido negativo**

Se marca a los arcos de  $J_{DER-11}$



$$J_{\text{DER-II}} = \{ J_{16 \rightarrow 15}, J_{15 \rightarrow 14}, J_{14 \rightarrow 13} \}$$

**C-1-3-DER-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^j l[J_{15+w \rightarrow 15+w+1}] + l[J_{15+w+1 \rightarrow 15+w}] |_{w=1} \leq 33.5; w = w_1 | w_1 |_0 > w_1 |_0; \forall j \neq 1$$

Lo anterior se cumple para  $W_3$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{\text{DER-III}}$

$$J_{\text{DER-III}} = \{ J_{17 \rightarrow 16}, J_{18 \rightarrow 17}, J_{19 \rightarrow 18}, J_{18 \rightarrow 17} \}$$

**C-1-3-DER-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

$$\sum_{w=1}^{15} l[J_{15-w+1 \rightarrow 15-w}] + l[J_{15-w \rightarrow 15-w+1}] |_{w=1} \leq 33.5; w = w_1 | w_1 |_0 > w_1 |_0; \forall j \neq 1$$

Lo anterior se cumple para  $W_2$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{\text{DER-IV}}$

$$J_{\text{DER-IV}} = \{ J_{15 \rightarrow 16}, J_{14 \rightarrow 15} \}$$

**C-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración**

$$L[J] = \sum_{i=1}^{19} l[J_{i \rightarrow i+1}] + \sum_{i=1}^{19} l[J_{i+1 \rightarrow i}] = 338.29 \text{ km}$$

En este caso  $J_0 = J_2 = J_1 \cup J_2 \cup J_3 = \{ J_{10 \rightarrow 9}, J_{11 \rightarrow 10}, J_{12 \rightarrow 11}, J_{13 \rightarrow 12}, J_{7 \rightarrow 8}, J_{7 \rightarrow 6}, J_8 \rightarrow 5, J_6 \rightarrow 7, J_9 \rightarrow 10, J_{10 \rightarrow 11}, J_{11 \rightarrow 12}, J_{12 \rightarrow 13}, J_9 \rightarrow 8, J_8 \rightarrow 9, J_8 \rightarrow 7, J_5 \rightarrow 6, J_5 \rightarrow 4, J_{14 \rightarrow 15}, J_{15 \rightarrow 16}, J_{16 \rightarrow 17}, J_{17 \rightarrow 18}, J_{14 \rightarrow 13}, J_{15 \rightarrow 14}, J_{16 \rightarrow 15}, J_{17 \rightarrow 16}, J_{18 \rightarrow 17}, J_{13 \rightarrow 14}, J_4 \rightarrow 5, J_4 \rightarrow 3, J_3 \rightarrow 2, J_{19 \rightarrow 18}, J_{18 \rightarrow 19}, J_{19 \rightarrow 20}, J_2 \rightarrow 3, J_3 \rightarrow 4, J_2 \rightarrow 1, J_{1 \rightarrow 2} \}$

$$L_{\alpha} = L[J_{\alpha}] = 328.09 \text{ km} < L[J] = 338.29 \text{ km}$$

$\alpha = \alpha + 1 = 4$  y se procede nuevamente a C-1)

### **C-1) cuarta iteración**

$$\alpha = 4$$

#### **C-1-1) Búsqueda de los arcos prioritarios**

##### **C-1-1-DER) Arco prioritario por la derecha**

$$\Lambda[J_{20 \rightarrow 19}; J_{8 \rightarrow 9}] = |8-19| = 11$$

$$J_{d \text{ der}} = J_{d \text{ der}} \in \mathbf{J} \mid J_{20 \rightarrow 19} \mid \Lambda[J_{20 \rightarrow 19}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{h+1 \rightarrow h}; J_{8 \rightarrow 9}] \mid 1 ; \\ \forall h \neq 8; h, 8 \geq i; J_{20 \rightarrow 19} \in \mathbf{J}_{\alpha} ; \Lambda[J_{20 \rightarrow 19}; J_{8 \rightarrow 9}] < \Lambda[J_{20 \rightarrow 19}; J_{8 \rightarrow 9}]$$

##### **C-1-1-IZQ) Arco prioritario por la izquierda**

$$J_{d \text{ izq}} = \{\emptyset\}$$

Ya no es necesario buscar un arco prioritario por la izquierda, dado que ya se cubrió todo el lado izquierdo.

#### **C-1-2) Localización de los servidores que atiendan a los arcos prioritarios**

##### **C-1-2-DER) Por la derecha: $J_{d \text{ der}}$**

##### **C-1-2-DER-B) Por la derecha y además $J_{d \text{ der}} = J_{d \text{ der}}$**

$$j' = j+k+1 \mid \sum_{k=0}^n I[J_{19+k+1 \rightarrow 19+k}] \leq 33.5; \quad k = k_i \mid k_i |_0 > k_j |_0; \forall i \neq j$$

Lo anterior se cumple para  $k_0$ , así pues la localización del servicio de la derecha es en:

$$j' = 19+0+1 = 20$$

### C-1-3) Verificación de la cobertura a otros arcos por el servidor recién ubicado

**C-1-3-DER) Por la derecha:  $J_d = J_{d \text{ der}}$**

**C-1-3-DER-I) En sentido positivo**

$$\sum_{w=1}^1 I[J_{20+w-20+w+1}] \leq 33.5; \quad w = w_i \mid w_i |_0 > w_j |_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior no se cumple para ningún valor de  $w$ , así pues:

$$J_{12Q-IV} = \{\emptyset\}$$

**C-1-3-DER-II) En sentido negativo**

Se marca a los arcos de  $J_{\text{DER-II}}$

$$J_{\text{DER-II}} = \{J_{20 \rightarrow 19}\}$$

**C-1-3-DER-III) En sentido negativo, luego de haber avanzado en sentido positivo**

$$\sum_{i=1}^1 l[J_{20+w-20+w+1}] + l[J_{20+w+1-20+w}] |l_1 \leq 33.5; w = w_i | w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior no se cumple para ningún valor de  $w$ , así pues:

$$J_{12Q-IV} = \{\emptyset\}$$

**C-1-3-DER-IV) En sentido positivo, luego de haber avanzado en sentido negativo**

$$\sum_{i=1}^1 l[J_{20-w+1-20-w}] + l[J_{20-w-20-w+1}] |w=1 \leq 33.5; w = w_i | w_i|_0 > w_j|_0; \forall j \neq i$$

Lo anterior se cumple para  $W_1$ , así pues se marcan los arcos de  $J_{DER-IV}$ :

$$J_{DER-IV} = \{J_{19-20}\}$$

**C-1-4) Prueba de la necesidad de hacer otra iteración**

$$L[\bullet] = \sum_{i=1}^{10} l[J_{i-1-i}] + \sum_{i=1}^{10} l[J_{i+1-i}] = 338.29 \text{ km}$$

En este caso  $J_n = J_2 = J_1 \cup J_2 \cup J_3 \cup J_4 =$  En este caso  $J_n = J_2 = J_1 \cup J_2 \cup J_3 \cup J_4 = \{J_{10-9}, J_{11-10}, J_{12-11}, J_{13-12}, J_{7-8}, J_{7-6}, J_{6-5}, J_{6-7}, J_{9-10}, J_{10-11}, J_{11-12}, J_{12-13}, J_{9-8}, J_{8-9}, J_{8-7}, J_{5-6}, J_{5-4}, J_{14-15}, J_{15-16}, J_{16-17}, J_{17-18}, J_{14-13}, J_{15-14}, J_{16-15}, J_{17-16}, J_{18-17}, J_{13-14}, J_{1-5}, J_{4-3}, J_{3-2}, J_{19-18}, J_{20-19}, J_{18-19}, J_{19-20}, J_{2-3}, J_{3-4}, J_{2-1}, J_{1-2}\}$

$$L_{n,i} = l[J_n] = 338.29 \text{ km} = L[\bullet] = 338.29 \text{ km}$$

$\alpha = \alpha = 4$  y se da por terminado el procedimiento, quedando ubicados 5 servidores en los siguientes nodos: 8, 9, 4, 16, y 20.

#### *IV.4 Resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo a la autopista México – Querétaro*

Naturalmente es posible repetir una gran cantidad de veces la aplicación del algoritmo tal y como se presenta en el apartado anterior, teniendo la obvia ventaja de variar los datos en cada corrida del algoritmo para simular distintos escenarios. De esta manera, resulta evidente pensar que lo anterior se ha practicado en forma reiterada durante el desarrollo del presente estudio.

Dado que el método de solución propuesto consiste en un algoritmo heurístico, resulta necesario el comprobar su validez mediante alguna de las técnicas de comprobación de las soluciones heurísticas que se enumeran en el capítulo anterior. En este caso se ha elegido de manera natural, implícita en el mismo algoritmo, la validación apelando a las condiciones de servicio en el caso más desfavorable, pues se cubre la totalidad de la carretera en un tiempo menor, o a lo más igual, a un tiempo preestablecido de acuerdo con los criterios de supervivencia de las víctimas de accidentes de tránsito.

Introduciendo al algoritmo como valores del caso más desfavorable, un valor de velocidad media  $v = 100$  [km/h] para los EMS y  $l_c = 33.5$  km del arco más largo, se observa que el mínimo de los mayores tiempos de respuesta dentro de la red puede ser de hasta  $t_r = 20.1$  [min], es decir, menor al tiempo crítico teórico  $t_c = 22.22$  [min] como plazo máximo para la llegada del 100% de los primeros auxilios a la escena de un accidente de tránsito en un medio rural, cuando el accidente no es mortal en potencia, según lo especificado en la tabla 1.8. En dicho caso más desfavorable se observa que la carretera queda cubierta en su totalidad con la ubicación de cinco servidores, ubicados en los nodos 8, 9, 16, 4, y 20.

Esto sin embargo, resulta costoso, pues se atiende a la carretera en condiciones superiores a las que se atienden en los países desarrollados, así que se han hecho pruebas

modificando cualesquiera de las dos variables preponderantes que entran en juego, y que son: el tiempo límite máximo de respuesta y la velocidad media de los EMS. En ambos casos se obtuvieron resultados menos costosos.

Al ser más factible el aumento del tiempo crítico que la garantía de una velocidad media más alta, se presenta a detalle el caso de aumentar dicho tiempo.

Al aumentar el tiempo crítico al valor que garantiza la respuesta oportuna del 90% de los EMS en 20 minutos ( $t_{ct} = 22.22$  [min]); el número de servidores necesarios decreció como se observa en la tabla 4.2.

En dicha tabla 3.2, se indica el tiempo que garantiza el sistema de atención que existe en la actualidad, compuesto por únicamente dos servidores en los nodos 6 y 9. Se presenta la mencionada tabla además, el caso hipotético en el que los nodos 1 y 20 funcionan como servidores, previendo que en la planeación del sistema actual se haya considerado a los EMS de Tepozotlán y de la Ciudad de Querétaro como disponibles para atender a la autopista.

Tiempo límite máximo de respuesta [min]	Garantía	Número de servidores empleados	Nodos en los que se ubican
20.1	100% en $t_{ct} = 20.1$ min	5	8, 9, 4, 16, 20
22.2	90% en $t_{ct} = 20$ min	4	8, 10, 4, 20
44.8	90% en $t_{ct} = 50$ min	2	6, 9
29.5	90% en $t_{ct} = 32.8$ min	4	1, 6, 9, 20

**TABLA 4.2** Tiempos críticos para distintas configuraciones de ubicación de los EMS en la autopista México - Querétaro.

Por último, en las figuras del anexo 3 se puede observar la localización geográfica de los servicios en los casos actual y en el propuesto para el tiempo máximo de respuesta de 20.1 minutos.

#### IV. 5 Generalización del algoritmo

Se han demostrado ambos, el funcionamiento y la validez, del algoritmo presentado para autopistas y en general, para cualquier vía o par vial de doble sentido con separación de cuerpos y/o división central, esto es, cuya red pueda representarse en términos de lo indicado en la figura 4.1. Además se ha indicado que en carreteras y para fines y efectos del Problema de Localización de los EMS, el anterior compone el caso más desfavorable. Así pues, es posible generalizar ahora la aplicación del algoritmo de solución hacia casos más sencillos del mismo problema, aquellos que se indican en la figura 4.2, con simplemente hacer las modificaciones que se presentan a continuación.

##### A) Vías de un solo sentido con separación de cuerpos y/o división central

- Eliminar el sentido ajeno al del recorrido, es decir:
- Suprimanse ya sean el sentido  $J_c = J_c$ , así como los pasos B-1-2-A), B-1-3-A), B-1-3-B-I), B-1-3-B-III), B-1-3-IV), C-1-2-DER), C-1-2-IZQ-A), C-1-3-DER), C-1-3-IZQ-I), C-1-3-IZQ-III) y C-1-3-IZQ-IV) y además, para cubrir C-1-1-DER), emplee (C-1-3-IZQ) quitando los pasos innecesarios; o bien, suprimanse el sentido  $J_c = J_c$  así como los pasos B-1-2-B), B-1-3-B), B-1-3-A-II), B-1-3-A-III), B-1-3-IV), C-1-2-IZQ), C-1-2-DER-B), C-1-3-IZQ), C-1-3-DER-II), C-1-3-DER-III) y C-1-3-DER-IV) y además para cubrir C-1-1-IZQ), emplee C-1-3-DER) suprimiendo los pasos innecesarios.

##### B) Vías de un solo sentido sin separación de cuerpos ni división central

- Eliminar el sentido ajeno al del recorrido, es decir:
- Suprimanse ya sean el sentido  $J_c = J_c$ , así como los pasos B-1-2-A), B-1-3-A), B-1-3-B-I), B-1-3-B-III), B-1-3-IV), C-1-2-DER), C-1-2-IZQ-A), C-1-3-DER), C-1-3-IZQ-I), C-1-3-IZQ-III) y C-1-3-IZQ-IV) y además, para cubrir C-1-1-DER), emplee (C-1-3-IZQ) quitando los pasos innecesarios; o bien, suprimanse el sentido  $J_c = J_c$  así como los pasos B-1-2-B), B-1-3-B), B-1-3-

- A-II), B-1-3-A-III), B-1-3-IV), C-1-2-IZQ), C-1-2-DER-B), C-1-3-IZQ), C-1-3-DER-II), C-1-3-DER-III) y C-1-3-DER-IV) y además para cubrir C-1-1-IZQ), emplee C-1-3-DER) suprimiendo los pasos innecesarios.
- Si las condiciones topográficas, fisiográficas y de servicios (electricidad, cobertura de sistemas de telecomunicaciones, agua, etc.) lo permiten, ubíquense los servidores a una distancia  $l_c$  entre sí, iniciando por cubrir a  $J_c$  cambiando el valor de k en B-1-2) y en C-1-2) por el valor de  $l_{ct}$ .
- Si no es posible lo que se propone en el punto anterior, identifíquense los lugares en los que es posible ubicar los servicios y manéjeselos como los nodos, esto es, sin cambiar k por  $l_{ct}$ .

### C) Vías de doble sentido sin separación de cuerpos ni división central

- Considérense  $J_c = J_{c^*} = J_c$  y elijase a uno de ellos como  $J_c$  y por tanto, suprimánsen ya sean los pasos B-1-2-A), B-1-3-A), B-1-3-B-III) y B-1-3-IV); o bien, los pasos B-1-2-B), B-1-3-B), B-1-3-A-III) y B-1-3-IV)
- Considérense  $J_{der} = J_{der^*} = J_{der}$  y elijase a uno de ellos como  $J_{der}$  y por tanto, suprimánsen ya sean los pasos C-1-2-DER-A), C-1-3-DER-III) y C-1-3-DER-IV); o bien, los pasos C-1-2-DER-B), C-1-3-DER-III) y C-1-3-DER-IV)
- Considérense  $J_{izq} = J_{izq^*} = J_{izq}$  y elijase a uno de ellos como  $J_{izq}$  y por tanto, suprimánsen ya sean los pasos C-1-2-IZQ-A), C-1-3-IZQ-III) y C-1-3-IZQ-IV); o bien, los pasos C-1-2-IZQ-B), C-1-3-IZQ-III) y C-1-3-IZQ-IV)
- Otra forma de resolver el problema, si las condiciones topográficas, fisiográficas y de servicios (electricidad, cobertura de sistemas de telecomunicaciones, agua, etc.) lo permiten, ubíquense los servidores a una distancia  $l_{ct}$  entre sí, iniciando por cubrir a  $J_c$  cambiando el valor de k en B-1-2) y en C-1-2) por el valor de  $l_{ct}$ .
- Si no es posible lo que se propone en el punto anterior, identifíquense los lugares en los que es posible ubicar los servicios y manéjeselos como los nodos, esto es, sin cambiar k por  $l_{ct}$ .



Otro caso particular en el que la solución del problema resulta más sencilla es aquel en el que no se cuenta con recursos suficientes para colocar todos los servidores necesarios para garantizar la correcta atención de toda la red. En tal caso el ajuste depende de los lugares que tienen prioridad para ser atendidos con base en cualquier otro criterio. (Número de muertos, número de heridos, número de accidentes, costo de los accidentes, tipo de vehículos involucrados en los accidentes, susceptibilidad de mejoras físicas en cada sitio de los accidentes, etc.)

- Establézcase el número de servidores a ubicar
- Suprímase todo C)
- Sustitúyase en lugar de  $J_c$  como el arco más largo, con  $J_c'$ , que deberá obedecer al criterio que se establezca para dar prioridad a los arcos
- Háganse  $m$  iteraciones sobre B), donde  $m$  sea igual al número de servidores a localizar, es decir, en el texto de B-1-4) cámbiense: " $\alpha = \alpha$ " por " $\alpha = m$ " así como "C)" por "B)"

## REFERENCIAS

- [1] Domínguez, J.M., "Estudio Geográfico de los Accidentes", Tesis Profesional, Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 1989
- [2] Olivera, F., "Estructuración de Vías Terrestres", CECSA, 1991
- [3] Handler, G.Y. and Mirchandani, P.B., "Location on Networks: Theory and Algorithms", Cambridge, Mass, The MIT Press, 1979.

## CONCLUSIONES

Las estadísticas del número de muertes a causa de accidentes de tránsito en carreteras, tienen tendencia creciente en la mayoría de las Naciones. Esto es más notorio en aquellos países que no son considerados como desarrollados y en el caso de México no se presenta la excepción. Además, el costo por concepto de accidentes de tránsito alcanza la cifra de hasta el 1% del PIB en algunos países, lo cual equivale a la aportación que hace a la economía el sector transporte, es decir, la aportación del sector se nulifica. Así pues es manifiesta la necesidad de prevenir los accidentes de tránsito en la medida de lo posible, así como la de atenderlos adecuadamente en aquellos casos no susceptibles de prevención.

Desde el punto de vista médico, luego de la ocurrencia de un accidente de tránsito se distinguen tres grandes momentos respecto de la atención a los pacientes víctimas de accidentes de tránsito:

- atención prehospitalaria
- atención hospitalaria
- atención poshospitalaria

En estudios estadísticos hechos por especialistas en Medicina se demuestra que una buena parte de las muertes no instantáneas en accidentes de tránsito ocurren a causa de no existir una respuesta adecuada por parte de los EMS en el primero de los momentos anteriores, por lo que resulta de primordial importancia un correcto diseño de los sistemas de los Servicios Médicos de Emergencia.

A efecto de dar una adecuada atención prehospitalaria se considera una buena atención en el caso de que se respete la llamada Hora de Oro que es la primer hora siguiente al acontecimiento de un accidente de tránsito y que es el tiempo máximo que se considera debe permanecer una víctima de un accidente de tal tipo sin recibir atención hospitalaria. Dentro de ese primer momento se distinguen los siguientes submomentos:

- Tiempo que se tarda en dar parte del accidente a los EMS

- Tiempo de respuesta de los EMS al lugar del accidente
- Tiempo de atención "in situ" por parte de los EMS
- Tiempo de traslado desde el lugar del accidente a un hospital.

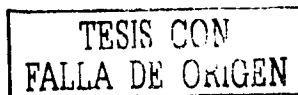
Una reducción en cualquiera de los tiempos anteriores, repercute directamente en la disminución de las muertes y por consiguiente de los costos sociales a causa de accidentes de tránsito, así, si se garantiza que los tiempos de respuesta de los Servicios Médicos de Emergencia (EMS) a los lugares de los accidentes son los adecuados, es decir si se controla correctamente a los tiempos del segundo de los anteriores submomentos, se puede tener una notable mejoría en cuanto a la disminución del número de víctimas de accidentes automovilísticos.

Según autores médicos que profundizan en el tema, para el caso de carreteras se considera como tiempo aceptable un lapso de 15 a 20 minutos a manera de tiempo de respuesta de los EMS a los lugares de los accidentes, de tal suerte que la restricción fundamental a considerar en el diseño de los sistemas de los EMS consiste en dicho tiempo y para cumplir con tal restricción, se tiene que el factor determinante es una correcta localización geográfica de los EMS.

La forma científica de determinar la localización geográfica óptima de los servicios de cualquier tipo recibe el nombre de Teoría de Localización y es un área de estudio propia de la Ingeniería de Sistemas. En este campo de la ciencia se han desarrollado algoritmos de solución para muy diversos tipos de Problemas de Localización durante casi cien años.

El problema típico de localización de servicios se compone de tres elementos básicos:

- La ubicación de los servicios o servidores tomando en cuenta sus limitaciones,
- la ubicación de la demanda consideradas sus exigencias y
- el espacio geográfico dentro del cual se dan las relaciones entre servidores y demanda



Haciendo uso de la Teoría de Localización, los algoritmos de solución a los problemas del tipo descrito, se pueden clasificar básicamente en dos grupos: exactos y heurísticos, según los tipos de metodología y solución que presentan. Sin embargo, al revisar en la literatura de dicha rama de la ciencia, no es posible encontrar algoritmo alguno, heurístico ni exacto, que resuelva el Problema de la Localización de los EMS en carreteras, ya que se trata de un caso muy particular dentro del universo de los Problemas de Localización. Así pues en la mejor de las ocasiones se encuentran soluciones para tal Problema en el caso de zonas urbanas.

La naturaleza tan singular de dicho problema radica en dos aspectos primordiales: primeramente, en el espacio geográfico que ocupa la red con que se debe representar al problema, que no corresponde al de las redes estudiadas hasta el momento y finalmente en el hecho de que la combinación de las posibles ubicaciones de los sitios de servicio así como de los sitios de demanda es muy rara dentro de la Teoría de Localización.

En el caso de las carreteras, al menos para autopistas y pares viales, se trata de redes con pares de arcos orientados en sentidos encontrados que conectan a pares de nodos que son estrictamente subsecuentes, esto por mencionar la singularidad de la red. De igual forma, la rareza respecto de la ubicación de los sitios de demanda y de servicio existe en tanto que los accidentes pueden ocurrir en cualquier lugar de los arcos, es decir la demanda es continua; sin embargo, la naturaleza de los EMS sugiere que los servicios deban ubicarse preferentemente en los nodos de la red (retornos de la carretera) pues es en donde tienen la posibilidad de atender al menos a dos arcos en forma indistinta, de tal suerte que la ubicación de los servicios atiende al caso discreto.

Además, no debe perderse de vista el que; a pesar de sus limitaciones, en los sentidos del entorno físico, así como de sus capacidades humana y tecnológica; los servicios deben satisfacer a la demanda dentro de un tiempo límite preestablecido. Así pues, resulta sencillo entender que el conjunto de singularidades de este tipo de Problema de Localización se traduce en un problema con un alto grado de complejidad, que hay que resolver, siendo lo más adecuado para ello el desarrollo de un nuevo algoritmo.

Los Problemas de Localización más complejos, históricamente se han resuelto mediante algoritmos heurísticos, que si bien no dan una solución óptima a los problemas que abordan, tienen la característica de arrojar una solución muy buena a un costo mucho más razonable que cuando se intenta una solución exacta, en términos de tiempo y costo del cómputo. Lo anterior sugiere el desarrollo de un algoritmo heurístico para resolver el Problema de Localización de los EMS en carreteras.

De tal modo, en el presente trabajo de Tesis se propone un algoritmo heurístico que básicamente consiste en acercarse a la solución óptima mediante iteraciones sucesivas. La validez del algoritmo que se presenta, se prueba al funcionar dicho método para las condiciones más desfavorables, lo compone una prueba válida para evaluar a las soluciones heurísticas. Se dice que el algoritmo funciona en las condiciones más adversas dado que resuelve el Problema de la Localización de los Servicios Médicos de Emergencia en carreteras para el caso de carreteras de doble vía en las que no es posible el cambio de sentido de circulación en cualquier punto sobre la carretera, dando cobertura total a los caminos dentro de un tiempo de respuesta máximo preestablecido, minimizando además el número de servicios.

Con lo antes mencionado, la aplicación del algoritmo se puede generalizar hacia casos más sencillos de Problemas de Localización, como lo son el caso de carreteras en las que es posible el cambio de sentido de circulación en todo momento, o aquel en el que los tiempos de respuesta establecidos son mayores, por ejemplo para otro tipo de servicios como servicios de asistencia mecánica automotriz.

Con el algoritmo propuesto, así como con su correspondiente extensión hacia los casos más sencillos de Problemas de Localización, es posible declarar como resuelto el Problema de la Localización de los Servicios Médicos de Emergencia en carreteras mediante un método que cumple con las formalidades de la Teoría de Localización.

# ANEXO 1

Table 4 Number of deaths in disasters, adjusted life years (DALYs) by cause, sex and mortality rate in WHO Region, estimates for 1990

Cause	Males		Females		Total		Rate per 100,000		DALYs		Rate per 100,000		DALYs	
	Number	Rate	Number	Rate	Number	Rate	Number	Rate	Number	Rate	Number	Rate	Number	Rate
<b>Total deaths</b>	1,020,000	15.0	1,020,000	15.0	2,040,000	15.0	1,020,000	15.0	2,040,000	15.0	1,020,000	15.0	2,040,000	15.0
<b>Disasters and other natural disasters</b>	100,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5
Earthquake	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
Flood	30,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45
Drought	20,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3
Hail	10,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15
Other	10,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15
<b>Other natural disasters</b>	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
Tsunami	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
<b>Other disasters</b>	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
War	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
<b>Other causes</b>	920,000	13.5	920,000	13.5	1,840,000	13.5	920,000	13.5	1,840,000	13.5	920,000	13.5	1,840,000	13.5
Ischaemic heart disease	300,000	4.5	300,000	4.5	600,000	4.5	300,000	4.5	600,000	4.5	300,000	4.5	600,000	4.5
Stroke	200,000	3.0	200,000	3.0	400,000	3.0	200,000	3.0	400,000	3.0	200,000	3.0	400,000	3.0
Respiratory diseases	150,000	2.25	150,000	2.25	300,000	2.25	150,000	2.25	300,000	2.25	150,000	2.25	300,000	2.25
Diabetes	100,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5	100,000	1.5	200,000	1.5
HIV/AIDS	50,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75	50,000	0.75	100,000	0.75
Tuberculosis	40,000	0.6	40,000	0.6	80,000	0.6	40,000	0.6	80,000	0.6	40,000	0.6	80,000	0.6
Malaria	30,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45	30,000	0.45	60,000	0.45
Hepatitis	20,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3	20,000	0.3	40,000	0.3
Other	10,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15	10,000	0.15	20,000	0.15

Annex Table 3 Deaths by cause, sex and mortality stratum in WHO Region, estimates for 1998

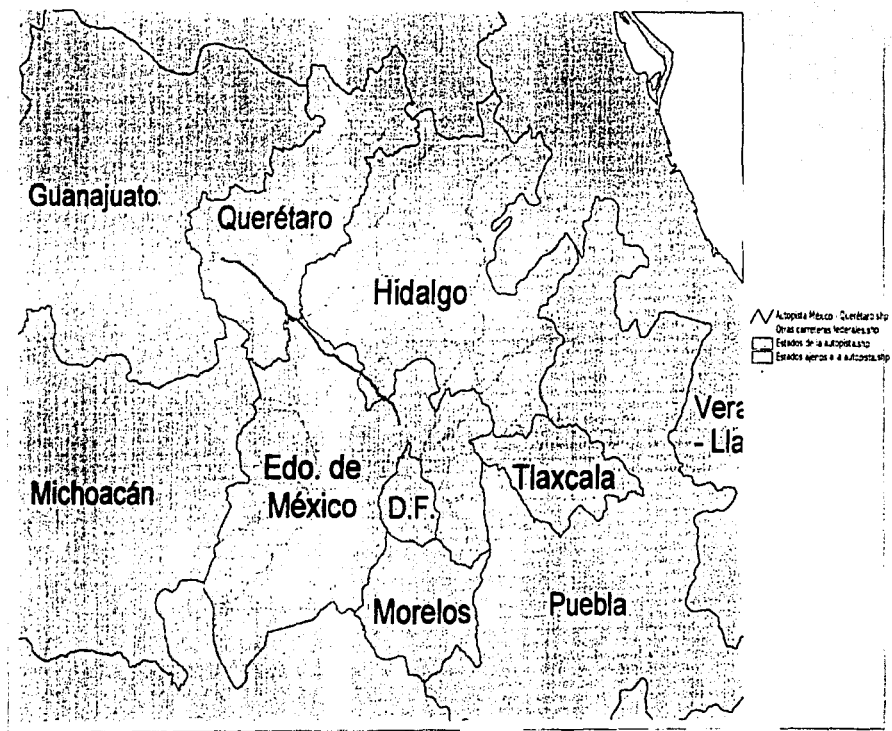
Cause of death	Males		Females		Total		Rate per 100,000 population	Rate per 100,000 population	Rate per 100,000 population	Rate per 100,000 population	Rate per 100,000 population	Rate per 100,000 population
	No.	Rate	No.	Rate	No.	Rate						
<b>TOTAL DEATHS</b>	<b>17 100</b>	<b>17 100</b>	<b>17 100</b>	<b>17 100</b>	<b>34 200</b>	<b>34 200</b>						
<b>Ischaemic heart disease</b>	10 000	10 000	10 000	10 000	20 000	20 000						
<b>Stroke</b>	8 000	8 000	8 000	8 000	16 000	16 000						
<b>Respiratory diseases</b>	5 000	5 000	5 000	5 000	10 000	10 000						
<b>Diabetes mellitus</b>	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	6 000						
<b>Alcohol-related</b>	2 000	2 000	2 000	2 000	4 000	4 000						
<b>Accidents</b>	1 000	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000						
<b>Other</b>	1 000	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000						
<b>Ischaemic heart disease</b>	10 000	10 000	10 000	10 000	20 000	20 000						
<b>Stroke</b>	8 000	8 000	8 000	8 000	16 000	16 000						
<b>Respiratory diseases</b>	5 000	5 000	5 000	5 000	10 000	10 000						
<b>Diabetes mellitus</b>	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	6 000						
<b>Alcohol-related</b>	2 000	2 000	2 000	2 000	4 000	4 000						
<b>Accidents</b>	1 000	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000						
<b>Other</b>	1 000	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000						

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



# ANEXO 2

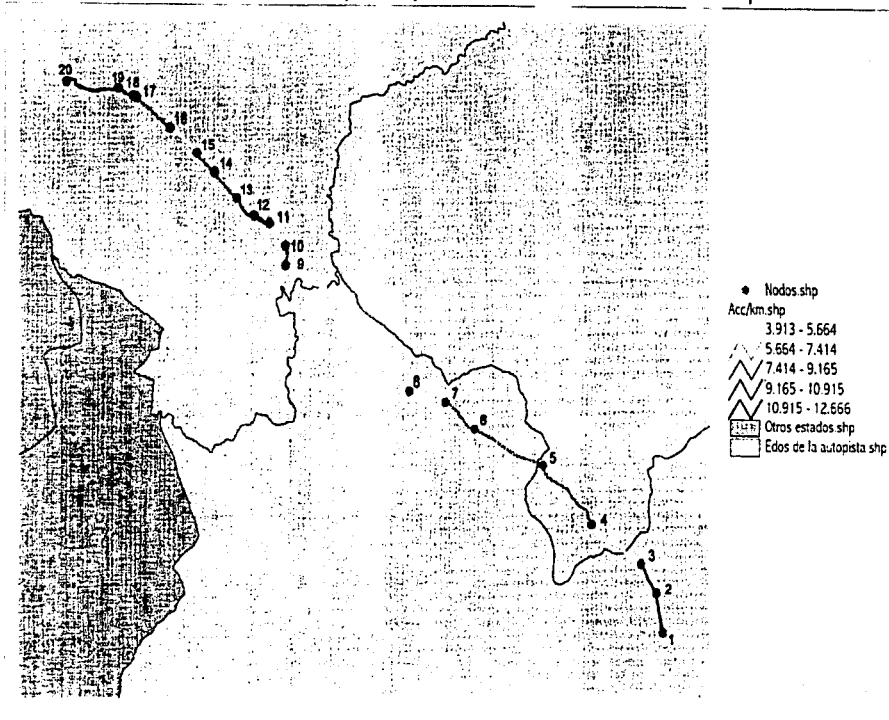
# Ubicación de la Autopista México - Querétaro en la Rep. Mexicana.



Localización de Servicios de Emergencia en Carreteras

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

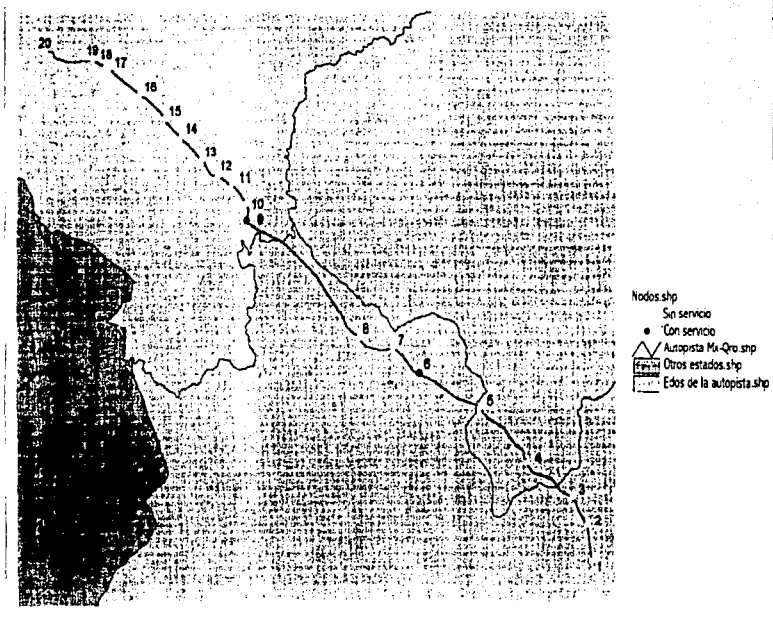
# Accidentes/km para pares de arcos de la autopista



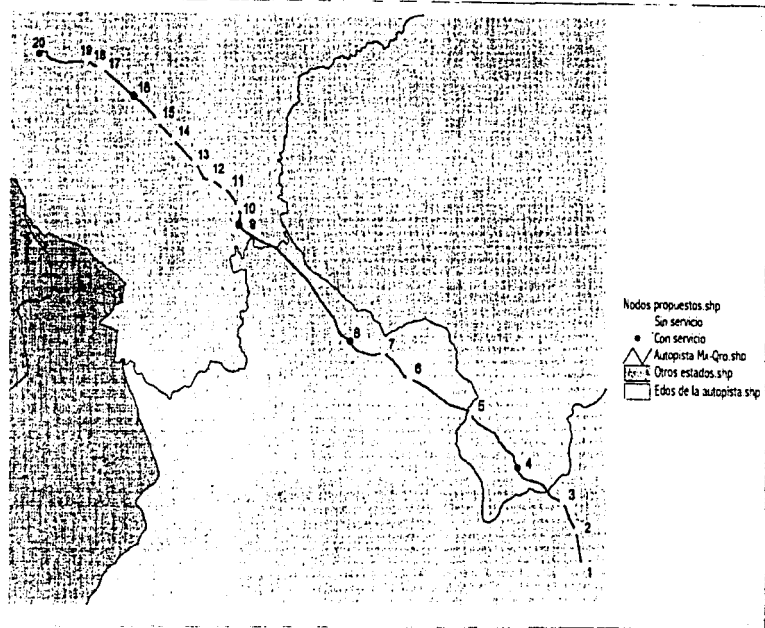
# ANEXO 3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Ubicación actual de los EMS. (90% de los vehículos en 50 min)



## Ubicación propuesta de los EMS. (100% de los vehículos en 20 min)



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN