



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO URBANO Y SU SIMULACIÓN
A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.
EL CASO DE TONANITLA, ESTADO DE MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA:
LUIS JOAQUÍN MARTÍNEZ GUAZO**

**ASESORES DE TESIS:
DRA. CARMEN VALVERDE VALVERDE
MTRO. GUSTAVO CAMACHO PALACIOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2021.





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.

Índice

1.Introducción	10
1.1. Problemática.....	13
1.2. Justificación.....	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos particulares:.....	14
1.4. Hipótesis.....	15
1.4.1. Hipótesis general	15
2. Marco teórico	16
2.1 Introducción.....	16
2.2. Ciudad	23
2.3. Periferia urbana	24
2.4. Urbanización y crecimiento urbano.....	25
2.5 Dispersión urbana.....	27
2.6. Patrones de crecimiento urbano.....	29
2.7. Causas del crecimiento y dispersión urbana	34
2.7.1. Crecimiento demográfico	34
2.7.2. Independencia de decisión.....	35
2.7.3. Crecimiento económico	35
2.7.4. Especulación.....	35
2.7.5. Tenencia de la tierra	36
2.7.6. Medio físico.....	36
2.7.7. Coste de vida y falta de viviendas asequibles.....	36
2.7.8. Demanda de viviendas/predios con mayor tamaño	37
2.7.9. Transporte y vías de comunicación	37
2.7.10. Viviendas unifamiliares.....	38
2.7.11. Familias nucleares	38
2.7.12. Crédito y políticas de desarrollo del gobierno	39
2.7.13. Políticas de planeación ineficaces	39
2.7.14. Incumplimiento de políticas de planeación	39
2.7.15. Inversión en viviendas	40
2.8. Problemáticas urbanas	40
3. Marco teórico metodológico	43

3.1. Introducción.....	43
3.2. Sistema	43
3.3. Conceptos básicos de los sistemas.....	44
3.4. Tipos de sistemas.....	46
3.5. Pensamiento sistémico.....	47
3.6. Complejidad	47
3.7. Uso de enfoque complejo en ciencias sociales, estudios urbanos y dispersión urbana	48
3.8. Teorías de la complejidad.....	49
3.9. Sistemas complejos	51
3.10. Técnicas de inteligencia artificial	53
3.10.1. Autómatas celulares (AC)	54
3.10.2. Modelo de Roger White (1996).....	58
3.11. Conclusión.....	61
4. Estado del arte	64
4.1. Introducción.....	64
4.2. Simulación los cambios de uso de suelo de Cincinnati, White (1996).....	65
4.2.1. Introducción.....	65
4.2.2. Características del modelo.....	65
4.2.3. Calibración del modelo.....	66
4.2.4. Simulación de usos de suelo de Cincinnati.....	68
4.2.5. Evaluación	69
4.2.6. Análisis de sensibilidad	71
4.2.7. Conclusiones	76
4.3. Cambios de usos de suelo y crecimiento urbano de Santo Tomás Ajusco – San Miguel Ajusco, Camacho (2012).	77
4.3.1. Introducción.....	77
4.3.2. Características del modelo.....	77
4.3.3. Calibración del modelo.....	78
4.3.4. Simulación de usos de suelo de los pueblos de Ajusco (2010, 2015, 2020).....	80
4.3.5. Evaluación	83
4.3.6. Conclusiones	86
5. Caso de estudio	87
5.1. Introducción.....	87
5.1.1. Antecedentes	88

5.1.2. Historia municipal	88
5.1.3. Localización	90
5.1.4. Medio físico.....	92
5.1.5. Localidades.....	94
5.1.6. Demografía	96
5.1.7. Vivienda	104
5.1.8. Marginación.....	108
5.1.9. Características catastrales.....	111
5.1.10. Tenencia de la tierra	115
5.2. Urbanización en Tonanitla.....	116
5.2.1. Situación actual	116
5.2.2. Crecimiento demográfico	116
5.2.3. Tenencia de la tierra	117
5.2.4. Coste de vida y falta de viviendas asequibles.....	118
5.2.5. Medio físico.....	119
5.2.6. Políticas de planeación ineficaces	120
5.2.7. Incumplimiento de políticas de planeación	121
5.2.8. Disputas legales	122
5.3. Usos de suelo.....	123
5.3.1. Tipos de usos de suelo	124
5.3.2. Evolución de los cambios de usos de suelo, periodo 2010-2018.....	127
5.4. Modelado.....	138
5.4.1. Características del modelo.....	138
5.4.2. Calibración del modelo.....	139
5.4.3. Simulación.....	144
5.4.4. Evaluación	147
5.5. Conclusiones	153
6. Conclusiones generales.....	156
Referencias bibliográficas.....	158
Anexos	164
A.1. NetLogo.....	164
A.1.1. Requisitos del sistema	165
1.3 Ambiente de programación	166
A.2. Componentes de la interfaz del modelo de Roger White en NetLogo 5.3.1.....	168

Figuras

Figura 2.1. Población urbana y rural mundial (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)	16
Figura 2.2. Relación entre población urbana y rural mundial (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018).....	16
Figura 2.1. Población urbana por continentes (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)	17
Figura 2.2. Porcentaje de población urbana por continente Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)	17
Figura 2.3. Porcentaje de población urbana por tipo de ciudad (1950-2030) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018).....	19
Figura 2.4. Población urbana y rural de México (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)	19
Figura 2.5. Relación entre población urbana y rural de México (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)	20
Figura 2.6. Relación entre población de ZMVM y población nacional (1950-2010) Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de población y Vivienda (1950-2010)	21
Figura 2.7. Relación porcentual entre entidades de la ZMVM Fuente: Elaboración propia a partir de Censo de Población y Vivienda de INEGI (1950-2010).....	22
Figura 2.8. Población por entidad federativa. Fuente: Elaboración propia a partir de Censo de Población y Vivienda de INEGI (1950-2010).....	22
Figura 2.9. Esquema de los tipos de crecimiento urbano de acuerdo con en Bhatta, 2010. Fuente: Imágenes Google Earth	33
Figura 3.1. Vecindad de von Neumann	56
Figura 3.10. Vecindad de Moore	56
Figura 3.3. Vecindad extendida de Moore.....	56
Figura 4.1. Usos de suelo fijos Fuente: White (1996)	66
Figura 4.2. Simulación de ciudad de Cincinnati en seis iteraciones a)0; b)10; c)20; d)30; e)40; f)45. Fuente: White (1996)	68
Figura 4.3. Resultado de 3 simulaciones y ciudad real de 1960 (d); iteración 50 (a); simulación con variantes aleatorias (b); simulación con la representación de red de carreteras (c). Fuente: White (1996).	70
Figura 4.4.. Efecto de las conveniencias geográficas. Simulación sin conveniencias (a) y Simulación sin vías de comunicación terrestre (b). Fuente: White (1996).....	73
Figura 4.5. Comparación de celdas de comercio (a), industria (b) y vivienda (c) de dos simulaciones con variaciones en el valor de aleatoriedad. Fuente: White (1996.).....	75
Figura 4.6. Área de estudio Fuente: Camacho (2012)	78
Figura 4.7. Usos de suelo reales 2005, ubicación de Zona Central y La Venta. Fuente: Camacho (2012)	80

Figura 4.8. Simulación de usos de suelo de San Miguel y Santo Tomás 2010 (a), 2015 (b), 2020 (c). Fuente: Camacho (2012)	82
Figura 4.9. Trazo urbano 2005 y simulación de cambios de uso de suelo 2010, 2015 y 2020. Fuente: Camacho (2012).	82
Figura 4.10. Comparación visual (cualitativa) de datos reales (a) y simulados (b) 2010. Fuente: Camacho (2012)	83
Figura 4.11. Sobreposición de área urbana real y simulada, 2010. Fuente: Camacho (2012)	84
Figura 4.12. Evolución de cambios de uso de suelo real y simulado (2005-2020). Fuente: Camacho (2012).	85
Figura 4.13. Comparación realizada con método RMSE. Fuente: Camacho (2012)	86
Figura 5.1. Glifo municipal. Fuente: Bando municipal 2010	88
Figura 5.2. Localización. Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geostadístico Urbano, INEGI (2010, 2018).....	91
Figura 5.3. Mapa orográfico del Norte del Estado de México. Fuente. Secretaría de Medio Ambiente (2010).....	92
Figura 5.4. Geología del norte del Estado de México. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente (2010).	93
Figura 5.5. Edafología del norte del Estado de México. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente (2010).....	94
Figura 5.6. Localidades de Tonanitla (2018). Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico 2018.....	95
Figura 5.7. Crecimiento demográfico municipal (a) y estatal (b) (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.	96
Figura 5.8. Proporción de población municipal por localidad. Elaboración propia a partir de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).	98
Figura 5.9. Tasas de crecimiento demográfico (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.	99
Figura 5.10. Tasas de crecimiento quinquenal por localidad (2005-2010). Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).	100
Figura 5.11 Lugar de residencia de población de Tonanitla(a) y Estado de México (b) (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010.....	101
Figura 5.12 Comparativa de lugar de nacimiento estatal y municipal (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010.....	102
Figura 5.13. Lugar de residencia por localidad (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010	103
Figura 5.14 Lugar de nacimiento por localidad (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010	104
Figura 5.15. Tasa de crecimiento quinquenal de viviendas por localidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Censo 2005	106
Figura 5.16 Índice de marginación a nivel localidad 2005-2010. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).	110
Figura 5.17. Claves catastrales de los municipios colindantes del Tonanitla 2015-2017. Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).	112

Figura 5.18. Valor catastral de los municipios colindantes del Tonanitla 2015-2017. Fuente:Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).	112
Figura 5.18. (Continuación). Valor catastral de los municipios colindantes del Tonanitla 2015(a), 2016(b) y 2017(c). Fuente: Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).....	113
Figura 5.19. Valor catastral por metro cuadrado de Áreas homogéneas der uso de suelo (2017). Fuente: Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).	115
Figura 5.20. Cultivos de secano, 2012: Fuente: Google Maps.	124
Figura 5.21. Vegetación urbana en Santa María Tonanitla, 2013. Fuente: Google Maps.	124
Figura 5.22. Actividad pecuaria, 2013: Fuente: Google Maps.	125
Figura 5.23. Territorio sin cobertura, 2010. Fuente: Google Maps	126
Figura 5.24. Asentamientos humanos en Colonia Valle Verde, 2012: Fuente: Google Maps.....	126
Figura 5.25. Área total de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 5.26. Participación porcentual de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 5.27. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	129
Figura 5.28. Área total de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia.....	130
Figura 5.29. Participación porcentual de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia.....	130
Figura 5.30. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2014). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	131
Figura 5.31. Área total de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia.....	132
Figura 5.32. Participación porcentual de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia.....	132
Figura 5.33. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2018). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	133
Figura 5.34. Área total de usos de suelo, 2010-2018. Fuente: Elaboración propia	135
Figura 5.35. Participación porcentual de usos de suelo, 2010- 2018. Fuente: Elaboración propia.....	135
Figura 5.36 Evolución del crecimiento urbano (2010-2018). Fuente: Elaboración propia.....	137
Figura 5.37 Interfaz de software NetLogo 3.1. Fuente: Elaboración propia.	139
Figura 5.38. Simulación de Tonanitla: a) Escenario 2014 real; b) Escenario 2018 real; c) Simulación 4 (2018); d) Simulación 8 (2022); Simulación 12 (2026). Fuente: Elaboración propia.	146
Figura 5.39. Comparativa visual de simulación de Tonanitla: a) Escenario 2018 real; b) Escenario 2018 simulado. Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 5.40. Tendencia de cambios de uso de suelo reales y simulados (2010-2026). Fuente: Elaboración propia.....	149
Figura 5.41 Generación de puntos aleatorios sobre escenario real 2018. Fuente: Elaboración propia.	150
Figura A.1. Interfaz de software NetLogo v.5.3.1.	166
Figura A.2. Interfaz del modelo de cambios de uso de suelo en Tonanitla	166
Figura A.3. Pestaña de información en NetLogo v. 5.3.1.....	167

Figura A.4. Pestaña de código del modelo de cambios de uso de suelo en Tonanitla	167
Figura A.4. Interfaz del modelo de White para la simulación de cambios de uso de suelo	168

Tablas

Tabla 2.1. Tipos de crecimiento urbano y sus principales características. Fuente: Adaptado de Bhatta (2010: 11), Wilson e.t. a.l. (2002).....	30
Tabla 4.1. Parámetros calibrados del mapa de Cincinnati Fuente: White (1996).....	67
Tabla 4.2. Matriz de coincidencia para ambas simulaciones teniendo de referencia el número de células Fuente: White (1996).....	71
Tabla 4.3. Similitud en resultados de la simulación Fuente: White (1996)	73
Tabla 4.4. Valores de accesibilidad, peso e inercia por uso de suelo Fuente: Camacho (2012).	79
Tabla 4.5. Matriz de transición Fuente: Camacho (2012)	80
Tabla 4.6. Tendencias de cambios de uso de suelo en porcentaje (2005-2020). Fuente: Camacho (2012).....	84
Tabla 5.1. Coordenadas extremas del área de estudio: Fuente: Elaboración propia.	90
Tabla 5.2 Principales elementos orográficos del Norte del Estado de México. Fuente; Secretaría de Medio Ambiente (2010).....	92
Tabla 5.3. Dimensión poblacional de Tonanitla (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.	96
Tabla 5.4. Número de habitantes por asentamiento (2010). Fuente: Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).	97
Tabla 5.5. Proporción de población municipal por asentamiento Fuente: Elaboración propia a partir de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).	98
Tabla 5.6. Tasas de crecimiento quinquenales (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.	99
Tabla 5.7 Tasas de crecimiento anuales (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.	100
Tabla 5.8. Tasas de crecimiento por localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).	100
Tabla 5.9. Lugar de residencia de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010	101
Tabla 5.10. Lugar de nacimiento de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010	102
Tabla 5.11. Lugar de residencia de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010	103
Tabla 5.12. Lugar de nacimiento de pobladores de Tonanitla por localidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010.....	103

Tabla 5.13. Viviendas particulares habitadas a nivel estatal, municipal y localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005	105
Tabla 5.14. Características de los espacios de viviendas particulares habitadas a nivel estatal, municipal y localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005.....	106
Tabla 5.15. Carencia de acceso a los servicios básicos en las viviendas particulares habitadas (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005	107
Tabla 5.16. Índice y grado de marginación municipal, 2005-2015. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).....	109
Tabla 5.17. Índice y grado de marginación por localidad, 2005-2010. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).....	110
Tabla 5.18. Valor catastral en millones de pesos y claves catastrales (2015-2017). Fuente: IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).....	111
Tabla 5.19. Padrón catastral del municipio de Tonanitla 2017. Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).	114
Tabla 5.20. Áreas homogéneas por uso de suelo y valor catastral por metro cuadrado (2017). Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).	114
Tabla 5.21. Número de terrenos y proporción de propiedad privada (2016). .Fuente: Elaboración propia a partir de Marco censal agropecuario (INEGI, 2016).	115
Tabla 5.22. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia.....	128
Tabla 5.23. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia.....	130
Tabla 5.24. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia.....	132
Tabla 5.24. Área total, participación y balance porcentual de usos de suelo, 2010- 2018. Fuente: Elaboración propia.....	134
Tabla 5.26 Valoración de la accesibilidad. Fuente: Elaboración propia.....	141
Tabla 5.27 Valoración de los pesos de los usos de suelo. Fuente: Elaboración propia.	141
Tabla 5.28 Valoración del factor de inercia. Fuente: Elaboración propia.	142
Tabla 5.29 Matriz de potencial de transición. Fuente: Elaboración propia.	143
Tabla 5.30 Porcentaje de área total ocupada por uso de suelo real (2010- 2018) y simulado (2018-2026) Fuente: Elaboración propia.....	145
Tabla 5.31 Comparativa de datos reales y simulados (2018). Fuente: Elaboración propia.	148
Tabla 5.32 Evaluación de la precisión con la matriz de error (2018). Fuente: Elaboración propia.	151
Tabla 5.33 Evaluación de la precisión con la matriz de error sin vías de comunicación (2018). Fuente: Elaboración propia.	152

1. Introducción

En el ámbito de la Geografía urbana, en las últimas décadas se ha generado un creciente interés en cuanto a las temáticas relacionadas con la planeación urbana, esto surge a partir del aumento de los impactos negativos y su alcance de estos en el ámbito medioambiental.

La Geografía se presenta como una ventana para analizar las características de los procesos por los cuales, se ha generado el desequilibrio entre las ciudades y su área de influencia, de forma que se pueda contribuir de manera sustancial en tareas relacionadas a la planeación de la ciudad.

Este trabajo se centró en identificar y analizar los factores que dirigen el crecimiento urbano del municipio de Tonanitla, así mismo, se examinó la evolución de los cambios de usos de suelo así como de los impactos crecimiento urbano no planificado y los efectos producidos en el área de estudio expresados mediante el proceso de dispersión.

Por otra parte, se buscó integrar la información documental con modelos basados en técnicas de inteligencia artificial con la finalidad de generar escenarios futuros de los cambios de uso de suelo en el municipio en función de las tendencias y dinámica actual del sistema urbano.

Así mismo, en esta tesis se experimentó con la capacidad de predictibilidad y aplicabilidad de instrumentos auxiliares (modelos de cambio de usos de suelo) para la planeación urbana en escenarios reales para obtener las posibles trayectorias de la urbanización en diferentes periodos de tiempo.

En el capítulo dos se expone el marco conceptual que sustenta la investigación, en la cual se abordan las perspectivas de la urbanización, conceptos como ciudad, periferia urbana, urbanización, crecimiento urbano, dispersión urbana, patrones de crecimiento urbano, entre otros.

Posteriormente, en el capítulo tres se presenta el marco teórico del campo de estudio de las técnicas de inteligencia artificial. En esta sección se muestran diversas áreas temáticas como los sistemas, tipos de sistemas, complejidad, sistemas complejos así como de las características principales técnicas de inteligencia artificial más comunes.

Después, en el capítulo cuatro se examina el estado del arte de la tesis, es decir, se llevó a cabo una recopilación de investigaciones internacionales y nacionales en las que se emplearon modelos de simulación de usos de suelo con resultados exitosos.

Finalmente, el quinto capítulo corresponde al estudio de caso, en el que se informa de las condiciones de la urbanización en el municipio de Tonanitla en conjunto con el análisis temporal de la evolución y dinámica de los cambios de uso de suelo desde el año 2010 al 2020. Después, se presentan los resultados obtenidos de la implementación del modelo en el área de estudio.

Con la elaboración de esta tesis se busca reforzar la importancia de aplicar metodologías para generar la caracterización del crecimiento urbano en un área dada y en una temporalidad específica así como de posibles escenarios de urbanización.

La importancia yace en la tendencia imperante hacia el aumento del número de habitantes que residen en ciudades y en consecuencia, también en el número de problemáticas propiciadas por la carencia planteamientos orientados a la planeación y el ordenamiento territorial.

La perspectiva del ordenamiento territorial surge como respuesta a múltiples problemas ambientales a escala local y global, como el deterioro de las condiciones del suelo, la incompatibilidad de los usos de suelo en el territorio, la falta de disponibilidad de agua, así como los efectos directos o indirectos en cuanto a la calidad del aire, entre otros.

La implementación de modelos espaciales como elementos auxiliares en las actividades de planeación y ordenamiento son de gran relevancia debido a la capacidad de obtener visualmente los efectos del desequilibrio territorial en escalas mayores, como las zonas metropolitanas, con una visión tanto a corto como a mediano y largo plazo, de forma que, las estrategias generadas desde el punto de vista territorial conllevará a estrategias para desarrollar los espacios rurales, ciudades pequeñas y medianas de forma integral.

Como efectos indirectos del ordenamiento territorial se menciona el fortalecimiento del carácter sustentable, el reforzamiento de las administraciones locales, generación de estructuras regionales en conjunto con la planeación para la dotación de infraestructura, equipamientos y servicios.

Con respecto al modelo para la simulación de los cambios de usos de suelo, se empleó el marco teórico de la complejidad donde las ciudades se conceptualizan como un sistema adaptativo complejo.

La ciudad se concibe como un sistema, ya que es un conjunto que tiene propiedades como totalidad, y cuya unidad no se deriva de la adición de los elementos constituyentes. Complejo porque la estructura es el resultado de un gran número de interacciones y de factores que no se relacionan de manera lineal y adaptativo, dada la naturaleza los componentes sociales y naturales que lo componen.

Para modelar la complejidad, se plantea que, los individuos son agentes y los usos de suelo las células que definen el espacio. La creación de patrones se basa a partir del comportamiento de los elementos individuales locales hacia lo global, la auto organización, interacción, retroalimentación y reglas, las cuales se conjugan para producir patrones de crecimiento urbano emergentes de una dinámica no lineal.

Entre las características de los modelos basados en técnicas de inteligencia artificial sobresale la compatibilidad de la información generada con los sistemas de información geográfica, la representación de fenómenos espaciales dinámicos, la capacidad de adaptabilidad a diferentes contextos, se basan en un conjunto de reglas que emulan una serie de comportamientos espaciales y a pesar de la simplicidad, son capaces de exhibir el funcionamiento y la organización de las ciudades.

1.1. Problemática

Tonanitla, Estado de México, se caracteriza por ser un municipio con un acelerado crecimiento poblacional, en el periodo de 2000-2015 (siendo en el año 2000 una localidad de la municipalidad de Jaltenco) la población aumentó 95 por ciento, en cambio a nivel estatal, pese a ser una de las entidades con mayor dinamismo demográfico, el valor fue de 29 por ciento (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015).

Así mismo, el territorio municipal se caracteriza por la predominancia de uso de suelo agrícola y con base al Plan de desarrollo de Tonanitla (2016), la economía local se sustenta en las actividades terciarias, siendo los comercios el sector productivo más constante.

Los municipios colindantes (Nextlalpan, Ecatepec, Coacalco, Tecámac y Tultitlán) junto con Tonanitla forman parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por lo cual, la inercia de la dinámica de crecimiento urbano sobre suelo periférico perfila a Tonanitla como espacio susceptible a presentar, en primera instancia, un proceso de dispersión urbana y posteriormente la consolidación de la Ciudad sobre el suelo de Tonaniltense.

La problemática radica en la forma desordenada del crecimiento urbano municipal, ya que se han identificado factores, los cuales al no mitigarlos conllevan a comprometer la sostenibilidad municipal. Entre los factores que fomentan perturbaciones en el territorio municipal destaca:

- Mezcla de usos agrícolas y urbanos, asentamientos humanos en áreas destinadas a la agricultura
- Ritmo de crecimiento demográfico acelerado
- Predominancia de tenencia de la tierra de tipo privada
- Disputas legales por la posesión de predios

1.2. Justificación

Dentro del ámbito de la Geografía urbana compete entender la dinámica tanto interurbana como intraurbana, por lo que los estudios del crecimiento urbano sobre las áreas periféricas brindan la posibilidad de generar un diagnóstico acerca de las causas que lo generan y los efectos (positivos y negativos) sobre el territorio bajo estudio y con ello, contar con mayores elementos para la planeación de las ciudades.

La urbanización fuera del margen del marco normativo de la planeación urbana que rigen a un espacio determinado, conllevan a un desarrollo no óptimo tanto de forma local como a escalas territoriales mayores, afectando en ámbitos como la calidad de vida de los pobladores, del medio ambiente, además de las implicaciones a los diversos sectores económicos entre otros.

Por lo tanto, el análisis comportamiento general brinda la posibilidad de poder actuar sobre la dinámica imperante, y en cuyas últimas instancias conlleve a detener y revertir los procesos negativos.

De esta manera, la predictibilidad generada en los materiales de este trabajo y el análisis de la dinámica urbana, podrá advertir y servir de base para la generación de propuestas e iniciativas considerando transformaciones a los procesos que rigen el presente funcionamiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Analizar los factores que originan y fomentan el crecimiento urbano disperso en el municipio de Tonanitla y estimar el impacto territorial futuro de este proceso por medio de escenarios de uso de suelo simulados.

1.3.2. Objetivos particulares:

- Identificar los factores que incentivan el crecimiento urbano en el área de estudio y de los cuales se deriva la dispersión urbana y conocer las consecuencias territoriales del crecimiento urbano disperso en el territorio en el periodo 2010-2018.
- Caracterizar y clasificar el patrón de crecimiento urbano disperso imperante en el área de estudio.
- Aplicar un modelo sustentado en autómatas celulares que permita simular la evolución del crecimiento urbano involucrando aspectos territoriales, de complejidad y de la capacidad de las herramientas informáticas.
- Exponer a nivel cuantitativo y gráficamente la evolución del proceso de dispersión urbana en el territorio a través de escenarios de cambios de uso de suelo simulados para el periodo 2022-2016.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- Entre los factores que incentivan el crecimiento urbano disperso en el territorio de Tonanitla es el acelerado ritmo de crecimiento poblacional, por consiguiente, la demanda de espacios para la vivienda sobre predios mayoritariamente de tenencia privada y con nula presencia de barreras topográficas, adicionalmente destaca la carencia de definición, aplicación y seguimiento a políticas de planeación que orienten el rumbo de la urbanización.
- Por su parte, el uso de suelo al considerarse como la ocupación de una superficie en un territorio y una temporalidad determinada en conjunto con las herramientas que ofrecen los SIG, permiten tipificar el tipo de crecimiento urbano imperante así como cuantificar las propiedades de extensión y su evolución de sus atributos.
- El conocimiento acerca de la dinámica de los procesos que originan la urbanización, de los patrones de crecimiento urbano y su relación, proveen información detallada sobre el estado actual del sistema urbano de Tonanitla, a su vez estos conocimientos funcionan como insumo para retroalimentar el proceso de modelación e interpretación de los escenarios simulados posibles.
- Se pueden generar escenarios y pronosticar los cambios de uso de suelo y del crecimiento urbano en el área de estudio a corto, mediano y largo plazo por medio de un modelo basado en autómatas celulares considerando aspectos como: las conveniencias geográficas entre los usos de suelo, la relación de los usos específicos con los alrededores y la accesibilidad.
- A partir de estos escenarios se puede visualizar gráficamente la evolución del proceso de dispersión urbana en el territorio y estimar posibles las problemáticas territoriales.

2. Marco teórico

2.1 Introducción

La urbanización representa una oportunidad para el generar un desarrollo sostenible, así mismo significa un desafío sin precedentes. Las tasas de crecimiento e intensidad de la población urbana y el área construida varían según la ubicación, no obstante los problemas, las dificultades y desafíos son una constante en espacios urbanos con déficits desde el punto de vista técnico y administrativo.

De acuerdo con cifras de las perspectivas de la urbanización mundial de ONU (2018), obtenidas a partir de censos, proyecciones y clasificaciones de la población de cada país, para el año 2010 (figura 2.1) se estimó un total de 7 000 millones de personas en el mundo, del cual, por primera vez en la historia, más del 50 por ciento (figura 2.2) eran residentes de ciudades y se calcula que esta tendencia continuará, ya que para el año 2050 se estima que la urbanización se aproxime a 70 por ciento, es decir, 6 600 millones de pobladores.

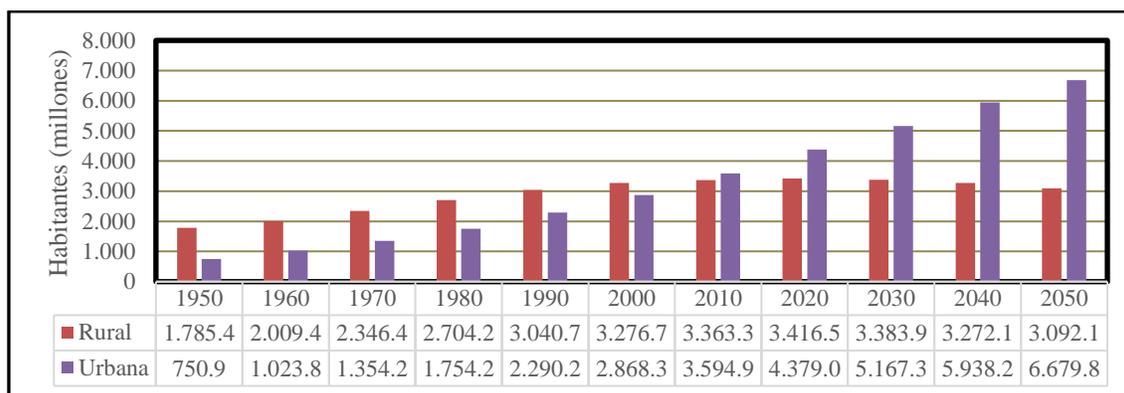


Figura 2.1. Población urbana y rural mundial (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

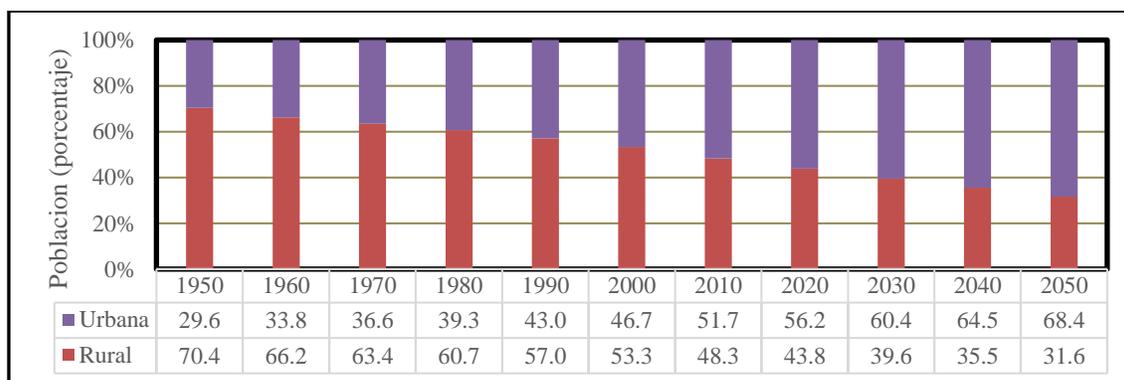


Figura 2.2. Relación entre población urbana y rural mundial (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

La demanda creciente de viviendas asequibles, redes de transporte eficaces, dotación de infraestructura urbana en áreas de crecimiento urbano extensivo, servicios básicos, entre otros; son algunos de los desafíos futuros para las ciudades, sin embargo, para algunas regiones del planeta la carencia e ineficacia de esas cualidades forma parte de su cotidianidad.

Existen grandes asimetrías entre el ritmo y la magnitud del proceso de urbanización de las distintas regiones del mundo, por un lado, la población urbana del continente asiático es la más numerosa, De acuerdo con ONU (2018) para el año 2010 se registró un aproximado de 1 900 millones (figura 2.3) de residentes urbanos, esa cantidad apenas representó un 44 por ciento (figura 2.4) en la proporción urbano rural.

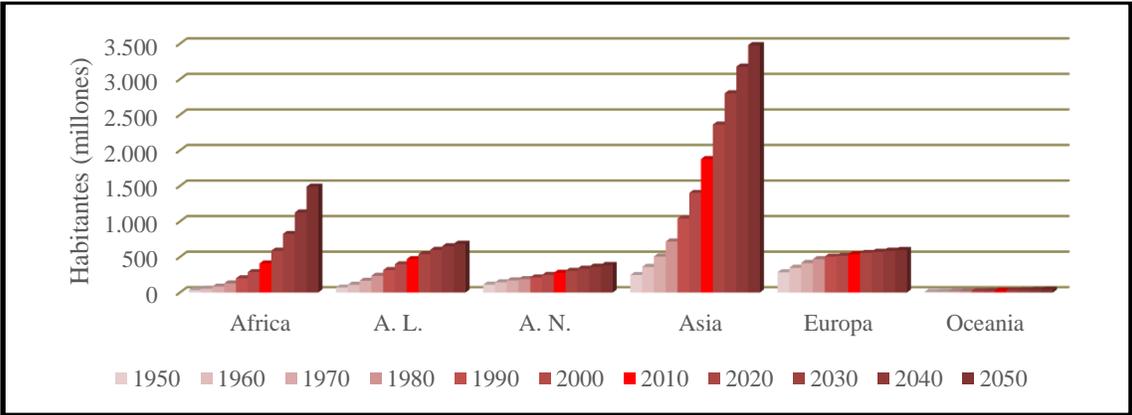


Figura 2.1. Población urbana por continentes (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

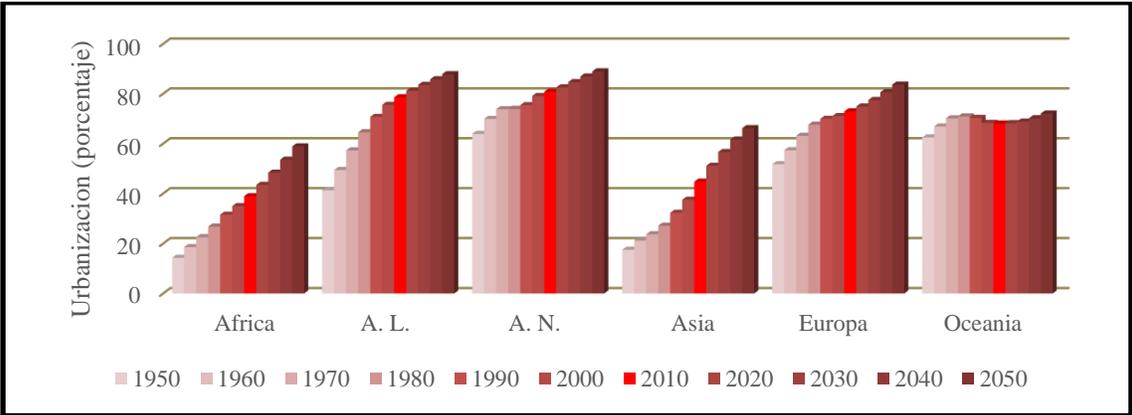


Figura 2.2. Porcentaje de población urbana por continente Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

Por el contrario, para el caso de América Latina la urbanización en ese mismo año registró un 78 por ciento superando los valores presentes en Europa, que de igual forma son elevados (72 por ciento), pero inferior a la situación de norteamericana (80 por ciento). Además, la población en ciudades en Latinoamérica en términos absolutos representó un total de 470 millones, es decir, inferior a una cuarta parte de la población asiática.

La distribución actual de la población en ciudades de América Latina se vinculan con orígenes muy diversos, de acuerdo con Lattes (1993) estas pueden ser la continuación de antiguos asentamientos precolombinos, también como un subproducto de la historia moderna de la inmigración internacional o de la reciente industrialización.

Para los países latinoamericanos la segunda mitad del siglo XX representó el fragmento de tiempo en el que se gestaron las condiciones para una creciente demografía, en el cual se daba pauta a la redistribución de la población del ámbito rural generando un emergente ámbito urbano; en definitiva, en América Latina se estaba generando el proceso de urbanización acelerada al nivel de las regiones más desarrolladas (Lattes, 1993.: 213).

Cabe mencionar que el crecimiento más rápido de la población urbana se dio a partir de la segunda guerra mundial, si bien, este suceso representó el auge de la forma de vida en ciudades, también reforzó la importancia de ciertas urbes sobre otras, tal como se evidencia en la tendencia hacia la concentración de grandes ciudades, tal es el caso de la Ciudad de México y el área metropolitana.

En América Latina y el Caribe, este proceso se hace notorio a partir de la década de 1970 (figura 2.5) con el aumento de habitantes residiendo en mega ciudades, las cuales según CEPAL (2017:15), se trata de ciudades con más de 10 millones de habitantes; y con ello la disminución de población en ciudades con valores inferiores a los 300 000 habitantes.

Para el caso mexicano las tendencias anteriormente expuestas no resultan ajenas, ya que, una gran variedad de efectos macro y micro han orientado a delimitar el perfil urbano de la población.

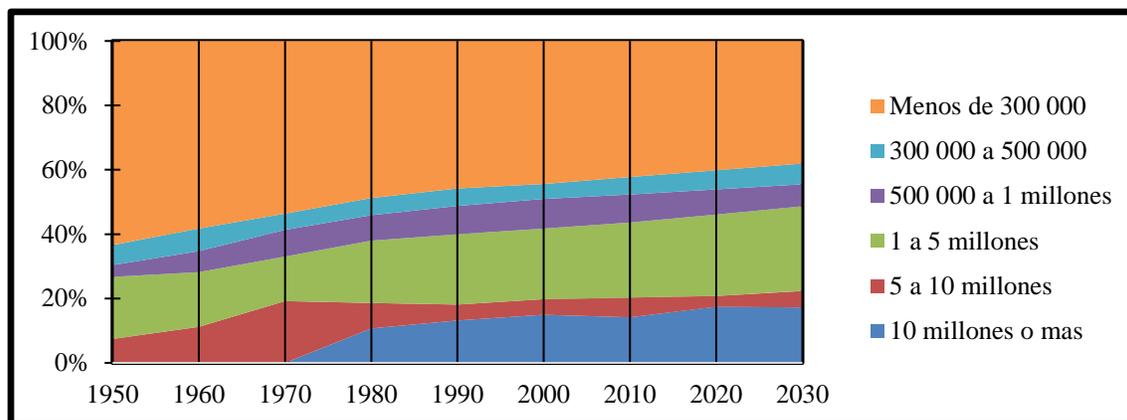


Figura 2.3. Porcentaje de población urbana por tipo de ciudad (1950-2030) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

Entre las causas macro de acuerdo con (Gutiérrez, 2003) destaca: el desarrollo industrial de mediados de siglo XX, proliferación de las tasas más altas en el mundo de natalidad, avances en el campo de la medicina y con ello la disminución de la mortalidad, además de considerar una creciente migración interna e inmigración externa, entre otros.

Siguiendo con el análisis de Gutiérrez (2003), en México no existe un criterio preciso, ni uniforme para categorizar las localidades, sin embargo con los datos y criterios obtenidos de ONU (2018) se obtuvo que a partir de la década de 1960, la proporción de población urbana superó a la rural (figura 2.6) en un periodo en el que la población total se aproximaba a los 40 millones de personas (figura 2.7).

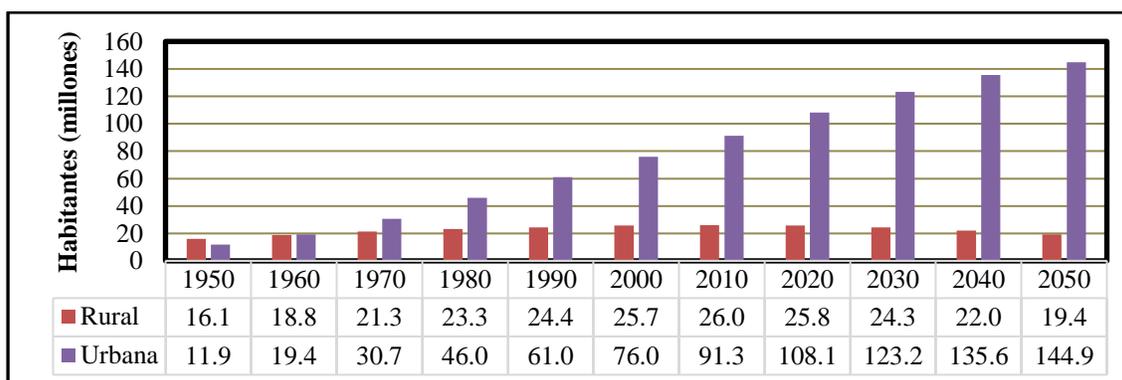


Figura 2.4. Población urbana y rural de México (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

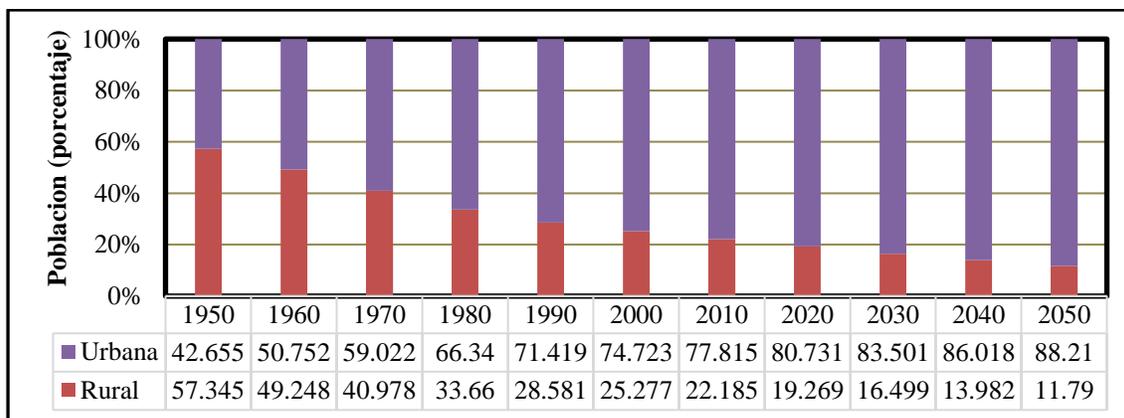


Figura 2.5. Relación entre población urbana y rural de México (1950-2050) Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (2018)

Dicha tendencia continuó y para el año 2010 se contabilizaron 91 millones de pobladores urbanos, representado un 77 por ciento, mientras que los pronósticos para 2050 estiman valores superiores al 88 por ciento.

Definitivamente, el país presenta un importante y notorio aumento de la población residiendo en centros urbanos, tanto en valor absoluto como en la proporción. Esto ha generado cambios en la estructura y en la articulación de las ciudades de México al grado de que, dado el aumento de la cobertura de los asentamientos urbanos, se crearan delimitaciones de las áreas metropolitanas para caracterizar a las ciudades, como el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM).

De acuerdo con CONAPO (2010) el término se empleó por primera vez en 1950 para referirse a la superficie del Distrito Federal en conjunto con los asentamientos ubicados en el municipio de Tlalnepantla. Para 2010, la metrópoli comprende en total a 76 municipios (16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y 1 de Hidalgo).

Dadas las condiciones de crecimiento acelerado de la población en México, el proceso de urbanización de la población se generalizó en el país modificando el sistema de ciudades nacional; no obstante, la Ciudad de México se caracterizó por presentar una tendencia centralizadora.

Según datos de los Censos de Población y Vivienda de INEGI, para el año 1950 se contabilizaron un aproximado de 28 millones de habitantes de los cuales 1.3 residía en la ZMVM, es decir, una proporción de 4.6 por ciento.

Sin embargo, 30 años la ZMVM se registró el punto máximo de concentración de habitantes al representar el 20.8%, situación en la cual la población nacional era de 69 millones mientras que para la ZMVM se contaba con 14.4 millones. Posterior a la cúspide de la década de los 80, la concentración de la población disminuye y para el año 2010 se calcula un 16 por ciento en relación al total nacional de 117 millones de habitantes (Figura 2.8).

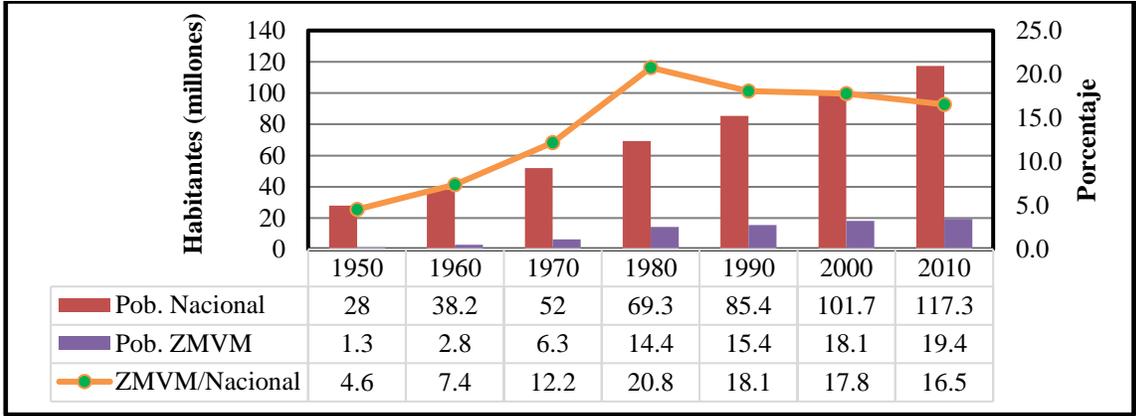


Figura 2.6. Relación entre población de ZMVM y población nacional (1950-2010) Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de población y Vivienda (1950-2010)

A pesar de la disminución de la proporción, los valores absolutos siguen presentando valores elevados. En un periodo de 60 años la ZMVM ha acogido a 18.1 millones de habitantes, sin embargo la distribución de la población no ha sido de forma homogénea en el territorio de las tres entidades que la componen.

Según datos de los Censos de Población y Vivienda de INEGI, en la ZMVM para el año 2010 habitaban 19 millones habitantes de los cuales el 54 por ciento residían en el Estado de México, el 45 por ciento en la Ciudad de México y menos del 1 por ciento correspondían al estado de Hidalgo (Figura 2.9 y 2.10).

Dicha tendencia contrasta con la de la década de 1960, periodo en el cual la Ciudad de México concentraba el 70 por ciento, superando el 30 por ciento del Estado de México y de Hidalgo. A partir de la década de los 2000 se delinea la tendencia del aumento de la población en el Estado de México, esto responde en parte a la disponibilidad de nuevas tierras para conversión a usos de suelo principalmente residenciales (habitacionales).

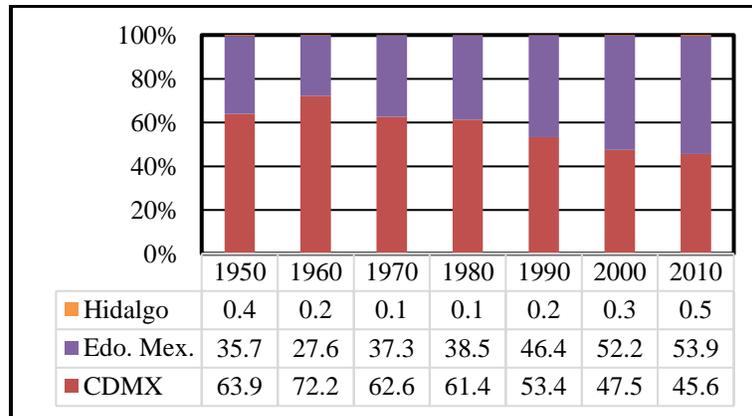


Figura 2.7. Relación porcentual entre entidades de la ZMVM Fuente: Elaboración propia a partir de Censo de Población y Vivienda de INEGI (1950-2010).

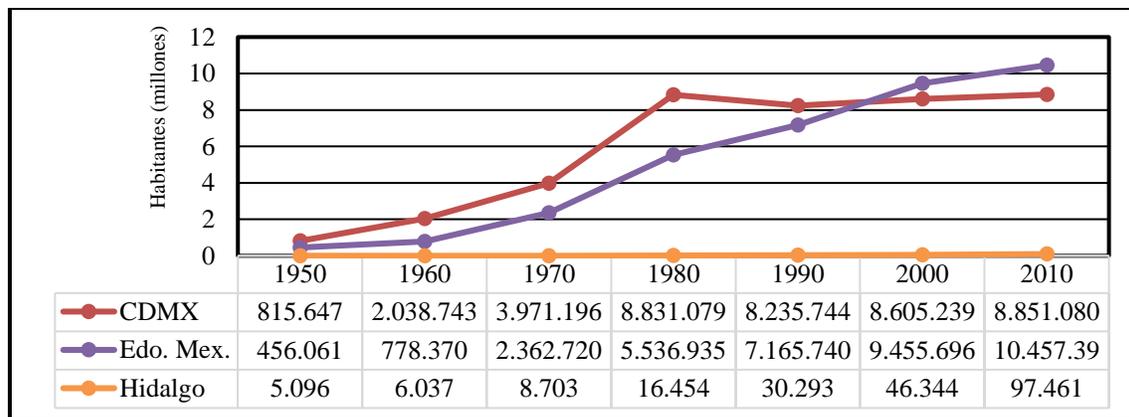


Figura 2.8. Población por entidad federativa. Fuente: Elaboración propia a partir de Censo de Población y Vivienda de INEGI (1950-2010).

De acuerdo con el Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México (2012), en el interior de la misma coexisten diversas formas de ocupación del territorio. Por un lado, en la Ciudad de México se dan los procesos de recuperación de áreas centrales en conjunto con la consolidación de la periferia urbana de la entidad por medio de la densificación del espacio (crecimiento vertical).

Por otro lado, en las áreas urbanas de municipios Estado de México e Hidalgo se combinan el proceso de consolidación periférica en los municipios próximos a la Ciudad de México, así como una marcada dispersión urbana. De forma que los asentamientos alejados de la ciudad central presentan condiciones de difícil accesibilidad que dificultan el funcionamiento de la movilidad cotidiana de sus habitantes.

En síntesis, dentro de una categoría funcional como el caso de la ZMVM existen diferencias entre el ritmo de crecimiento y el modo de ocupación del espacio. Para la Ciudad de México se presentan las condiciones para la concentración o densificación y por el contrario para el Estado de México e Hidalgo predomina la dispersión de las localidades urbanas.

Finalmente, para fines prácticos se entiende al crecimiento urbano como el aumento de la población e infraestructura de una ciudad, de ahí que, en esta tesis la discusión se orienta sobre las transformaciones en cuanto al avance horizontal de la infraestructura, el espacio físico o construido de la Ciudad de México sobre el territorio periférico del Estado de México.

2.2. Ciudad

Existe una cantidad numerosa de definiciones de este ámbito de estudio, al mismo tiempo, resulta complicado establecer un concepto en la que se fijen los límites del alcance del mismo.

En la literatura especializada de diversos campos disciplinarios, con frecuencia se suele evocar a cuestiones tanto cuantitativas centrados en sus características visibles o tangibles como las dimensiones morfológicas de la ciudad, tasas e indicadores demográficos, además de variables de corte económico; así como de sus aspectos cualitativos haciendo referencia a imaginarios, política entre otros (Capel, 1975).

De manera general, se emplea la definición que brinda Hiernaux en su texto acerca de la dimensión ontológica de las ciudades:

La ciudad se caracteriza por la concentración de una cierta cantidad de población, una cierta densidad física, la presencia de actividades no directamente ligadas a la producción del campo y un modo de vida distinto del que prevalece en las zonas que —en forma de antinomia— se calificaron como “rurales”(Hiernaux, 2006:9).

En definitiva, la difusión del modo de vida urbano generó que la distinción entre ámbitos fuera cada vez más difícil, por lo cual, para los estudios urbanos se tuvieron que desarrollar nuevas líneas de investigación para analizar el proceso que se estaba llevando a cabo.

Para diferenciar el término de ciudad de lo urbano, se emplea la definición que brinda Capel (1975), en la cual menciona que lo urbano es una proyección de una forma específica de poblamiento y de organización espacial en el que se plasma; la ciudad, por tanto es producida, modelada y condicionada por los urbano, es decir por la estructura social debido a la totalidad de relaciones que la constituyen.

2.3. Periferia urbana

De acuerdo con Arteaga (2005), las ciudades actualmente comprenden un marco territorial más amplio, el término de periferia comenzó a ganar mayor difusión hasta consolidar ideas teóricas y espaciales de lo que se reconocía como tal. De la misma forma ha ido evolucionando las variables del concepto, su localización, las características principales y de la misma forma los valores subjetivos.

Como se afirma anteriormente, esto permite la demarcación rasgos que comprende la ciudad, así mismo, se trata de un ámbito que por su naturaleza presenta un gran dinamismo y forma parte de una realidad cambiante a lo largo del tiempo.

Las ciudades, en el periodo previo a la Revolución industrial solían ser una unidad espacial en la cual los límites físicos y administrativos estaban claramente definidos. En cambio, con el avance de la industrialización, las comunicaciones y las transformaciones de los medios de transporte originaron la ampliación de la ciudad al territorio contiguo (Capel, 1975).

Dadas las imprecisiones que implica generar un solo concepto acerca de la periferia urbana, se tomará como referencia lo que menciona Arteaga (2005). Es el resultado de la agregación temporal de espacio construido en función de un centro, área central o centralidad de una estructura urbana; esto se identifica a partir de 3 aspectos por los cuales se puede caracterizar: la distancia, la dependencia y la deficiencia.

En primer lugar, en lo que refiere a distancia, se ubica a la periferia en una posición alejada y perimetral con respecto al centro, de igual manera se puede entender como aquella corona de crecimiento más reciente y alejado de la ciudad central.

En segunda instancia, la dependencia en términos funcionales, la periferia a pesar de ser un territorio urbano contiguo a la ciudad y compuesto por franjas con diferente grado de urbanización, la dinámica interna está influenciada mayoritariamente por la gran ciudad, la posición geográfica de estos espacios les asigna nuevos roles, baste, como muestra, las ciudades dormitorio, ausencia a nivel local de un núcleo con capacidad funcional y largos desplazamientos necesarios hacia los sitios de trabajo y educación.

Finalmente la deficiencia, en las ciudades latinoamericanas la zona periférica generalmente se caracteriza por el alto contraste con las características de una ciudad consolidada próxima, se le asocia con las características de “Marginalidad...desorden, degradación y baja calidad de vida urbana” (Arteaga, 2005: 101).

En síntesis, la periferia urbana es el la concentración de la población con influencia, directa o indirectamente, de las actividades de las ciudades, lo que conlleva a cambios tanto demográficos, como también económicos y culturales. Todas estas observaciones se relacionan con los conceptos de urbanización, crecimiento urbano y dispersión urbana, los cuales se plantearán a continuación.

2.4. Urbanización y crecimiento urbano

En el transcurso de esta tesis constantemente se empleará el término de urbanización, por lo que es conveniente dilucidarlo. De acuerdo con Clark (1982 citado en Bhatta, 2010: 2), el desarrollo urbano es el proceso de emergencia del mundo dominado por las ciudades y los valores urbanos.

La ocurrencia del desarrollo urbano es tan general y sus implicaciones son tan amplias que sería necesario generar una revisión a gran parte de la historia social y económica reciente para hacer frente a sus alcances.

El surgimiento de grandes ciudades y su creciente influencia espacial propiciaron cambios en los lugares y patrones de vida rurales, hacia unos predominantemente urbanos en la mayoría de los países durante los últimos dos siglos.

Actualmente, no solo un gran número de personas vive en o en las inmediaciones de ciudades, sino que segmentos enteros de la población están completamente asociados con los valores urbanos, expectativas y estilos de vida.

Para generar el entendimiento de este proceso será necesario establecer una distinción clara entre los dos procesos principales del desarrollo urbano: el crecimiento urbano y la urbanización.

Según Clark (1982 citado en Bhatta, 2010: 2), el crecimiento urbano es un proceso espacial y demográfico el cual se refiere a la importancia creciente de las localidades y ciudades para la concentración de la población dentro de una economía y sociedad en particular. Esto ocurre cuando los cambios de distribución de la población se producen principalmente de áreas rurales hacia territorios basados principalmente en viviendas y ciudades.

La urbanización, por otro lado, es un proceso social y cultural (no espacial) que se relaciona con los cambios de comportamiento y las relaciones sociales que ocurren como resultado de la interacción entre los habitantes de las localidades y ciudades.

Esencialmente, se refiere al cambio complejo de los estilos de vida derivado del impacto de las ciudades en la sociedad. Por lo que a medida que la población rural se torna hacia las ciudades, el crecimiento urbano resulta, es decir, el proceso de urbanización se refiere a la cantidad de crecimiento simple de la población implicando cambios en las estructuras económicas, sociales y políticas de una región.

La rápida urbanización de la población es una de las causas de muchos cambios ambientales y sociales en el entorno urbano y sus efectos están fuertemente relacionados con el rápido crecimiento físico de las áreas urbanas por sobre las rurales, los cuales bajo una administración escasa, limita su capacidad para proporcionar servicios como energía, educación, atención médica, transporte, saneamiento y seguridad.

En resumen, la implicación directa de la urbanización se atribuye al crecimiento espacial de pueblos y ciudades, de ahí que al crecimiento en áreas urbanas se le denomine como crecimiento urbano.

2.5 Dispersión urbana

La elección del término de dispersión urbana para el desarrollo de esta investigación se basa en que el concepto liga una serie de características que brindan la posibilidad de analizar y generar la comprensión de lo que experimenta o acontece en la periferia de las megaciudades. El significado ha sido debatido en diversas ciencias, por lo que su entendimiento dista de ser estático y obsoleto.

La acción de definir o conceptualizar presenta grandes dificultades en función de la naturaleza de las características que pueden presentar cada proceso o fenómeno bajo estudio; en este caso la dispersión urbana se trata de un concepto que ha sido empleado de manera muy flexible. La problemática de la unificación de criterios en la literatura tanto internacional como nacional se agudiza debido a las adaptaciones que se le da en cada contexto espacial y temporal.

El significado hasta el momento parece muy distante de tener una definición generalizada. Muñiz y García (2013) tras una extensa revisión a lo que evoca el término, resumen que puede referirse a uno o varios de los siguientes elementos:

- Dispersión urbana como suma exhaustiva de dimensiones descriptivas, es decir, de carácter multidimensional.
- Dispersión urbana como sinónimo o equivalente a suburbanización.
- Dispersión urbana como proceso que impacta de forma negativa en el ambiente.
- Dispersión urbana como indicador de alto ritmo de urbanización y por lo tanto un consumo excesivo de suelo.
- Dispersión urbana como proceso contrario al policentrismo.
- Dispersión urbana como difusión de servicios urbanos, tales como la adopción de funciones y modelos de vida propios de las grandes ciudades.
- Dispersión urbana como un espacio desestructurado o amorfo.

Mientras tanto, Bhatta (2010) añade una serie de las cualidades que complementan las definiciones anteriormente examinadas:

- Se lleva a cabo principalmente en zonas marginales ubicados en la periferia de las ciudades, de igual modo a lo largo de caminos y de las carreteras que conectan una ciudad.
- En algunos casos se suele presentar coexistencia con el ámbito rural agrícola.
- Urbanización de baja densidad.
- Los nuevos asentamientos pueden presentar carencia de servicios urbanos básicos.

Por otro lado, en lo que concierne a esta tesis se tomará la postura de Sudhira y Ramachandra (citados en Bhatta, 2010: 8), en la cual lo consideran como un patrón de crecimiento urbano, el cual se desarrolla de forma no planificada y por ende desigual, esto a su vez está impulsado por una multitud de procesos que conducen hacia una utilización ineficiente de los recursos.

Dicha forma de ocupación del territorio propicia cambios en el uso del suelo así como de la cobertura del territorio, ubicadas por lo general en las zonas periféricas de la ciudad central, puesto que la dispersión conlleva explícitamente al aumento en el área urbanizada y pavimentada.

En resumen, la gama de respuestas para abordar un mismo proceso resulta ser natural, esta flexibilidad en el concepto permite que se pueda adaptar a las condiciones propias del espacio denominado objeto de estudio.

Una visión rígida del concepto podría llegar a concebirse como algo incoherente e inconsistente si se admite que se abarca todos los aspectos del mismo, sin embargo, existe un consenso en cuanto a las consecuencias que en su mayoría, a partir de la experiencia de los estudios urbanos en América Latina, son de carácter negativo.

Conviene subrayar, la necesidad de diferenciación entre los términos de expansión y dispersión urbana. La diferencia entre estos conceptos, se basa a que este último es una forma en el que se puede dar el crecimiento urbano, ya que para su caracterización se emplean patrones espaciales del modelo disperso (Santos-Preciado, 2012: 2), entre los que

destacan: el crecimiento de relleno, de expansión, periférico, aislado, de rama lineal y de rama agrupada (Bhatta, 2010: 11), los cuales se expondrán en la siguiente sección.

2.6. Patrones de crecimiento urbano

De entre las diversas clasificaciones propuestas en la literatura, la sugerida por Wilson (2003 citado en Bhatta, 2010) resulta ser la más adecuada en función de los intereses de esta investigación, debido a que reduce, sintetiza, argumenta y desglosa las características de cada uno, finalmente se expone de manera visual las propuestas de los patrones espaciales.

Dicho lo anterior, las categorías de crecimiento urbano identificadas son de 3 tipos: crecimiento de relleno, crecimiento en expansión y crecimiento periférico; este último se divide a su vez en otros 3 subtipos: crecimiento de tipo lineal, en ramas aisladas y en ramas agrupadas. En resumen, las características principales de estos patrones espaciales se desarrollan en la tabla 2.1.

Será importante señalar lo que se menciona de Wilson (2003, citado en Bhatta, 2010) con respecto a lo que se puede considerar como dispersión:

Wilson no ha intentado caracterizar la dispersión, argumentando que crear un modelo de crecimiento urbano en lugar de un modelo de dispersión urbana nos permite cuantificar la cantidad de tierra que ha cambiado a usos urbanos, y deja que el usuario decida lo que considera como dispersión urbana (Bhatta, 2010: 12).

El grado de libertad que evoca el no caracterizar la dispersión urbana ofrece muchas posibilidades, ya que, el investigador generará, a partir de la evidencia y resultados de la investigación, la deducción sobre las características del sitio bajo estudio.

Por lo tanto, bajo el concepto de dispersión urbana, se tuvo como tarea de determinar si el desarrollo urbano que se está llevando a cabo se caracteriza principalmente por poseer una connotación negativa, cuando menos para América Latina, en sus elementos tanto del territorio como en la calidad de vida de sus pobladores.

Tipo	Descripción
<i>Crecimiento de relleno</i> (<i>Infill growth</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Desarrollo de una pequeña extensión de tierra rodeada principalmente por cobertura urbana ○ Estímulo para desarrollar terrenos baldíos en áreas ya construidas ○ Generalmente asociado a sitios donde existen instalaciones públicas como alcantarillado, agua y carreteras ○ Supone la desaparición de objetos como parches y corredores.
<i>Crecimiento en expansión</i> (<i>Expansion growth</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Representa una expansión del parche urbano (o mancha urbana) existente ○ Denominado desarrollo marginal metropolitano o desarrollo urbano marginal ○ Desarrollo de cobertura que se propaga de manera unidireccional en franjas más o menos paralelas desde un borde.
<i>Crecimiento periférico</i> (<i>Outlying growth</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se caracteriza por un cambio de no desarrollado ha desarrollado en la cobertura de suelo ○ Se produce más allá de las áreas desarrolladas existentes (de la franja urbana) ○ La designación de crecimiento exterior se divide en: Crecimiento aislado, rama lineal, rama agrupada.
<i>Crecimiento aislado</i> (<i>Isolated growth</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Construcción o nueva casa rodeada generalmente de zonas no urbanas y a cierta distancia de un área urbana existente.
<i>Rama lineal</i> (<i>Linear branch</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crecimiento urbano ligado a una nueva carretera, un corredor o un nuevo desarrollo lineal ○ Generalmente rodeado por tierras no desarrolladas y se encuentra localizado a cierta distancia de las tierras desarrolladas existentes
<i>Rama agrupada</i> (<i>Clustered branch</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nuevo tipo de crecimiento urbano que no se encuentra dentro del tipo lineal ni aislado, sino un clúster o un grupo. ○ Es típico de nuevos vecindarios o desarrollos inmobiliarios grandes, compactos y densos.

Tabla 2.1. Tipos de crecimiento urbano y sus principales características. Fuente: Adaptado de Bhatta (2010: 11), Wilson e.t. a.l. (2002).

Con el objetivo de explicitar los patrones especiales, la figura 2.9 representa de manera gráfica y esquemática los 3 tipos generales de crecimiento urbano además de los 3 subtipos asociados al crecimiento periférico.

Será preciso mostrar que recurrir a los patrones en un momento dado, es posible que pueda ser señalado como un fenómeno estático, sin embargo, bajo estos medios, es posible identificar la distribución espacial.

Harvey y Clark (1965, citado en Bhatta, 2010: 16) persuaden de dicha situación, al considerarlo como un proceso de carácter dinámico, ya que existen cambios en cuanto a la configuración espacial a lo largo del tiempo, además, bajo la dimensión temporal es posible identificar tanto las causas que originan el proceso como de las consecuencias o efectos.



Rama lineal (Linear branch), San Jerónimo Xonacahuacan, 2003



Rama agrupada (Cluster branch) Santa María Tonanitla y Villas de Santa María, 2005



Crecimiento en expansión (Expansion growth) Texcoco de Mora, 2017



Crecimiento aislado (Isolated growth) San Lorenzo Tlalmimilolpan, 2017



Crecimiento de relleno (Infill growth) Prados de San Francisco (Nextlalpan), 2010-2018

Figura 2.9. Esquema de los tipos de crecimiento urbano de acuerdo con en Bhatta, 2010. Fuente: Imágenes Google Earth

En suma, el ritmo de crecimiento de las ciudades no es un proceso generalizado ni homogéneo, al contrario, cada Ciudad presenta diferentes fases de desarrollo durante los periodos de tiempo; indiscutiblemente el ámbito urbano está en constante dinamismo, por lo cual, para la reducción de la incertidumbre y ambigüedad en la búsqueda de la descripción del fenómeno surge la importancia de la generación de patrones del crecimiento urbano, ya que, estos permiten la caracterización del territorio en una temporalidad determinada, sirva de ejemplo, el papel que desempeña la cartografía generada a partir de imágenes aéreas o satelitales.

2.7. Causas del crecimiento y dispersión urbana

Como se ha dicho anteriormente, es necesario precisar las causas particulares que originan o impulsan el proceso de crecimiento y dispersión urbana, puesto que, posterior a esta labor se identificará los proceso que ha intervenido y que se capitalizan en la dinámica imperante que genera este tipo de desarrollo urbano, también, es el punto de partida en cuanto a los estudios de carácter prospectivo.

A continuación, se enlistan las causas genéricas que de acuerdo con Bhatta (2010: 18-27) generan el crecimiento y dispersión urbana, es necesario recalcar que se realizaron modificaciones al listado original, por la similitud entre algunos orígenes.

Para cada área de estudio pueden ligarse más de dos motivos, además, dependiendo de cada caso presentan diferencias debido a las especificaciones de cada sitio en función de los contextos espaciales y temporales propios; este listado está lejos de ser definitivo, por lo que solo se exponen los que se repiten en mayor medida en la literatura.

2.7.1. Crecimiento demográfico

Una población humana asentada en un determinado espacio, analizada durante un periodo de tiempo establecido, tenderá a modificar el número de integrantes; en términos cuantitativos. El crecimiento rápido de la población urbana modifica sus cifras a partir de dos grandes clasificaciones: crecimiento natural, relacionado a los nacimientos y defunciones, y crecimiento social, cuya característica principal son los desplazamientos desde o hacia un territorio específico (Hernández, 1996: 18) como parte de la migración interna o externa.

2.7.2. Independencia de decisión

El sector privado se convirtió en un factor importante en cuanto al crecimiento urbano, a causa de su inclusión en el esquema de participación como proveedores de espacios habitables. Los desarrolladores de vivienda a menudo pueden tomar decisiones por su cuenta para cumplir con los objetivos internos propuestos con el fin de la maximización de las ganancias.

Esto es especialmente aplicable cuando en el territorio carece de un plan de ordenamiento, por lo que se da cabida a las edificaciones fuera de lo establecido, cambiando de esta forma la vocación del suelo y propiciando la discontinuidad en los usos de suelo.

Esta divergencia de intereses públicos y privados puede resultar en última instancia en un desarrollo descoordinado, descontrolado y no planificado (Harvey y Clark, 1965 citado en Bhatta, 2010: 21)

2.7.3. Crecimiento económico

El aumento en cuanto a la cobertura del área urbana responde a intereses tanto económicos y políticos, una de las causas es la poca valoración que se le da al suelo como fuente principal de bienes y suplantándolo por la concentración de las actividades económicas (sector industrial con tendencia mayoritaria al sector servicios), así como del mercado.

De igual forma el crecimiento económico impulsa la promoción de arribo de pobladores en detrimento del suelo forestal por la construcción de viviendas (Soto, 2015: 136), generando de esta forma un ritmo acelerado de edificación de espacios habitacionales y otras infraestructuras resultando en desarrollos discontinuos no relacionados.

2.7.4. Especulación

La especulación sobre las políticas de generación de equipamiento gubernamental futuro (como vías de transporte, etc.) pueden alentar a las personas a vislumbrar sobre la dirección y la magnitud del crecimiento futuro de donde resulta un crecimiento prematuro sin una planificación adecuada.

Erba (2013) identifica tres escenarios, la ciudad, la periferia y el ámbito rural; en la zona urbana el valor de suelo se diferencia por factores como la edificabilidad y su ubicación, de la misma forma, cuanto más cercano esté al centro y distritos centrales de negocios, el uso será más intensivo, y por ende, el valor aumenta.

La periferia urbana, al ser zona propensa y probable de urbanización, afecta las expectativas acerca de la anticipación de las tierras en la periferia urbana haciendo que algunos propietarios retengan tierras del mercado. El resultado es un patrón de desarrollo discontinuo.

2.7.5. Tenencia de la tierra

Las zonas agrícolas que cambian su vocación a usos de suelo urbanos residenciales se llevan a cabo de forma legal a través de los lineamientos y demarcaciones municipales. En consecuencia, con el incumplimiento de los requerimientos, el predio puede originar disputas legales debido a problemáticas relacionadas con la regularización, de subdivisión, de impuestos o con los inquilinos.

Esto a menudo provoca que se dejen espacios vacíos en zonas desarrolladas o, por el contrario, que se generen asentamientos en zonas susceptibles a riesgos o en áreas protegidas.

2.7.6. Medio físico

Frecuentemente, el crecimiento urbano homogéneo sobre un territorio se ve obstaculizado por las características propias del medio físico, sirva de ejemplo las propiedades como la topografía accidentada, zonas de humedales, cuerpos de agua, entre otros.

Por consiguiente, se crean las condiciones para un crecimiento heterogéneo, ya que en muchos casos estos rasgos fisiográficos no se pueden superar y, por lo tanto, el uso urbano se edifica sobre sitios que presentan menos obstáculos.

2.7.7. Coste de vida y falta de viviendas asequibles

Los costos altos del suelo de las ciudades son un factor importante del que se deriva el elevado precio de las viviendas, como resultado directo las hace inaccesibles para una gran proporción de la población.

En general, la mayoría de los residentes urbanos buscan establecerse en el centro de la ciudad, pero el costo de vida y de propiedad más bajo los atrae a la periferia urbana, donde el costo no resulta prohibitivo y a su vez proporcionando una oportunidad de vivienda económicamente satisfactoria.

De manera que se ha desarrollado un proceso de expulsión de personas con menores ingresos hacia la periferia, de forma que forma, fungen el rol de válvula de escape a la presión habitacional como reflejo de la desigualdad social y económica imperante (Ponce, 2017).

2.7.8. Demanda de viviendas/predios con mayor tamaño

Otro factor que origina la expulsión de la población en las ciudades se debe al fenómeno de carencia de espacio suficiente para vivir a causa de los elevados precios de la vivienda dentro de las ciudades en comparación al suelo periférico o rural. De forma que la periferia o el campo se tornan como espacios habitables, en el que la población puede adquirir más espacio para vivir en el que en la ciudad.

A pesar de que un mayor consumo per cápita de espacio habitable puede indicar condiciones para vivir dentro de los confines del crecimiento urbano compacto. Sin embargo, si la demanda de más espacio vital obliga a la construcción de un desarrollo de baja densidad en la periferia o el espacio rural, entonces se trata del proceso de expansión.

2.7.9. Transporte y vías de comunicación

Las vías de comunicación son un elemento esencial para el desarrollo de la economía urbana, ya que permiten el movimiento de capital, mercancías y personas hacia las actividades principales; por lo tanto, las rutas de transporte permiten el acceso de la ciudad hacia las zonas periféricas y, de forma análoga, son responsables del crecimiento urbano lineal (Bhatta, 2010: 24-25).

Cabe destacar que, tanto las autopistas como la generación progresiva de nuevos caminos, modelan y pronostican las zonas susceptibles a urbanizarse, además, Mientras tanto, el valor del suelo está relacionado con la accesibilidad y centralidad brindada desde los medios de transporte (Abramo, 2012: 48).

2.7.10. Viviendas unifamiliares

La construcción de la vivienda en conjunto con las causas anteriormente señaladas, proliferaron principalmente para viviendas unifamiliares en conjuntos horizontales (en lugar de edificios multifamiliares) ubicados en las zonas periféricas (Correa, 2012), por lo tanto, el desperdicio del espacio vertical aumenta significativamente el crecimiento horizontal de las Ciudades.

Entre las ventajas del crecimiento vertical son que debido a que este tipo de construcciones ocupan un espacio menor que el horizontal, por un lado, brinda la posibilidad de ser respetuoso con el medio, debido a que no se requiere de infraestructura adicional para la dotación de servicios, además, limita el número de traslados debido a la proximidad y alternativas en cuanto a movilidad (Economía Solidaria, 2012.: 20). Además la instalación y mantenimiento de la infraestructura es menos costosa

2.7.11. Familias nucleares

La clasificación de hogares de INEGI, identifica dos tipos: los familiares y los no familiares; en el cual el primer tipo se caracteriza por poseer parentesco con el jefe de familia

A su vez, se subdivide en hogares nucleares (pareja con o sin hijos), ampliados (hogar nuclear más otros parientes) y compuestos (hogar nuclear o ampliado más personas sin parentesco); por el contrario los no familiares, se presenta cuando no se posee un parentesco, se subdivide en unipersonales (una persona) y corresidente (dos o más personas sin parentesco) (INEGI, 2015).

Comúnmente el consumo per cápita de área en los hogares ampliados y compuestos es menor que el de la familia nuclear, debido a cuestiones, sirva de ejemplo, áreas comunes las cuales son compartidas por todos los miembros del hogar. La transición de una familia conjunta a una familia núcleo o a una unipersonal también crea una demanda de nuevas viviendas para las personas.

2.7.12. Crédito y políticas de desarrollo del gobierno

Tradicionalmente la actividad inmobiliaria estaba asociada principalmente con la capacidad de pago y condiciones de seguridad social de los adquirientes, no obstante, durante el siglo XXI las facilidades de crédito y préstamo, los bajos tipos de interés y el desarrollo programas gubernamentales que consisten en la aportación de subsidios federales a empresas constructoras, instituciones hipotecarias, personas acreditadas por servicios de seguridad social.

De manera que, actualmente esta actividad económica se caracteriza por la dotación de créditos con facilidad y flexibilidad (Correa, 2012). La limitación actual radica en el monto del crédito al que se accede, dando como resultado, “la capacidad real para adquirir viviendas de promoción privada que se ofertan en localizaciones periféricas” (Lara, 2017: 50).

2.7.13. Políticas de planeación ineficaces

La falta de políticas de planeación coherentes, en definitiva, se debe a múltiples causas (Díaz, 2013: 15-16) entre las que destaca:

- La nula definición de un modelo de desarrollo urbano que oriente las políticas públicas.
- Carencia en cuanto a la coordinación intersectorial.
- Ausencia de organismos metropolitanos o intermunicipales.
- No capacidad técnica ni financiera en las instituciones públicas locales.
- Persistencia de recursos financieros en proyectos que fomentan el crecimiento disperso.
- Subsidios para viviendas ubicadas en la periferia.
- Utilización de fondos municipales para la construcción de infraestructura vehicular orientada hacia las periferias.
- La no generación de metas cualitativas acerca de las necesidades de vivienda de población vulnerable, entre otros.

2.7.14. Incumplimiento de políticas de planeación

Tener una política de planificación adecuada no es suficiente, sino que su implementación y cumplimiento exitosos es más importante. La aplicación fallida de los planes de uso de la tierra es una de las razones de la expansión descontrolada, ya que la aplicación es a menudo obstaculizada por el manejo fragmentado generado a partir de la

división política administrativa en conjunto de la debilidad institucional a nivel municipal.

Por otro lado, los objetivos presentan bifurcación de intereses a causa de la diversidad de planes y programas de las distintas instituciones públicas y privadas inmiscuidas en el tema. Por otra parte, la ausencia de datos sistematizados y confiables aleja la posibilidad de caracterizar las problemáticas y la toma de decisión de manera informada (Díaz, 2013: 15-16).

2.7.15. Inversión en viviendas

A menudo, los habitantes de las zonas urbanas compran segundas viviendas en el campo como inversiones futuras, esto fomenta entre los desarrolladores de vivienda la construcción en el campo. Las bajas tasas de interés y la alta demanda de vivienda hacen que las inversiones en vivienda rural sean más atractivas.

García (2016) identifica las características principales de la segunda residencia por parte del pequeño o mediano inversor inmobiliario, en primer lugar, se trata de un espacio que tiene como objetivo el ser alquilada, arrendada, prestada o ser utilizada como vivienda de fin de semana, después, la localización puede ser entorno a un sitio de interés o a un centro urbano.

2.8. Problemáticas urbanas

Las consecuencias del crecimiento urbano pueden generar impactos tanto positivos como negativos. El crecimiento urbano puede repercutir de forma positiva en aspectos como una mayor producción económica, mejor calidad vida, mayor cobertura de servicios básicos (como transporte, alcantarillado y agua), así como otros servicios especializados (como mejores instalaciones educativas o de atención médica) a más personas.

Sin embargo, en muchos casos, el crecimiento urbano es descontrolado y descoordinado, lo que resulta en un patrón descontrolado, dando como resultado, que los impactos negativos anulen los aspectos positivos. Cabe mencionar que esta situación varía en función del contexto político, económico y social de cada país. A nivel global, las ciudades son el ámbito en el que habita en mayor proporción de la población (figura 2.1), además:

Fomenta el crecimiento y está generalmente asociada con una mayor productividad, oportunidades y calidad de vida para todos. Las ciudades crean riqueza, generan empleos y encaminan el progreso humano, aprovechando las fuerzas de la aglomeración y la industrialización. Las ciudades también ofrecen grandes libertades sociales (ONU, 2016: 58).

No obstante la tradición urbana en países de tercer mundo, en el entorno de las periferias, no ha estado ligado con el crecimiento económico e industrial como ocurrió en el caso europeo o estadounidense (ONU, 2016).

Indiscutiblemente, la generalización de este paradigma se inicia, se desarrolla y se impulsa desde el siglo XIX, dados los impactos que acarrea las revoluciones industriales y los avances en las técnicas agrícolas. Representó un periodo de transición demográfica que encaminó a las primeras explosiones en cuanto a ese rubro; especialmente expresándose en transformaciones demográficas principalmente en los países industrializados de Europa y en el continente americano con Estados Unidos.

El s. XX se caracterizó por ser el siglo de Oro de las ciudades, ya que, los avances tecnológicos formaban parte inseparable de lo urbano; las innovaciones médicas y farmacológicas habían adquirido un nuevo rol aumentando la esperanza de vida, elevando las tasas de natalidad en contraste con la reducción diametral de la mortalidad; también la revolución del transporte era uno de los avances tangibles, pero cabe mencionar que al mismo tiempo aumentaba las diferencias entre el crecimiento y desarrollo económico de países pobres y ricos (Hobsbawn, 1994 : 348).

En síntesis, la 2^{da} revolución industrial tanto la migración externa como interna consolida el modo de vida urbano generalizado en el mundo. En cambio, durante y posterior a la 3^{ra} revolución¹, se acrecentaron las diferencias entre los países de primer mundo y de tercero (Bottino, 2009), representando este periodo para los países ubicados en América, África y

¹ La 3^{ra} revolución industrial es un término acuñado por Jeremy Rifkin para explicar el proceso de cambio en la base tecnológica en relación con las que se empleaban desde la 2^{da} revolución (combustibles fósiles, concentración de capitales, entre otros), esto además representa la transición hacia el uso generalizado de nuevas tecnologías de la información y comunicación, así como la búsqueda de la generación de energías renovables. (Selva, 2012)

Asia, la etapa con mayor crecimiento en cuanto a los términos demográficos así como de la tasa de urbanización².

La urbanización y el crecimiento urbano en el Tercer Mundo, como lo señala Anzano (2010: 8), han estado desligados del crecimiento económico e industrial paulatino que ocurrió en occidente, dado que el crecimiento demográfico en conjunto con la ineficiente gestión y la escasa planeación de las ciudades han mitigado las potencialidades que ofrece la vida dentro de las urbes.

Existe un gran debate en torno al rumbo de la estructura de las ciudades, hay argumentos a favor de la concentración de la población a partir de ciudades policéntricas así como las ideas en favor a dispersión del área urbana, pero cabe mencionar que la realidad de muchas ciudades latinoamericanas la falta planeación y administración ha propiciado que coexistan estos modos de concebir estructuralmente las urbes.

Citando a Bazant (2001) la realidad de la periferia a partir de la ausencia de planeación es muy visible localmente en el ámbito territorial por la desarticulación funcional urbana entre asentamientos o colonias periféricas y la ciudad, en la irracionalidad de usos del suelo, insuficiencia de equipamiento y servicios.

Lo anterior se traduce en modelos urbanización insostenible, dirigiéndose hacia escenarios en donde prolifera la dispersión urbana, cuyas consecuencias sociales pueden ser evidenciadas por las crecientes formas de desigualdad, exclusión, privación, además las dificultades que plantea la integración de nuevos pobladores (Anzano, 2010), por lo tanto es necesario el empleo del concepto de dispersión.

De esta forma, la ocupación del territorio de forma ineficiente supone, en función del uso de suelo y el ritmo de cambio, alteraciones irreversibles con variaciones en el impacto en términos de sostenibilidad, habitabilidad, entre otros. No obstante, dentro del campo emergente de las ciencias de la complejidad, empleada en diversas ciencias y disciplinas, se han desarrollado una serie de herramientas y modelos las cuales se puede obtener, por ejemplo, tendencias de cambio en la morfología de las ciudades.

² Tasa de urbanización según CEPAL (2009) es el porcentaje de población que reside en áreas urbanas respecto a la población total.

3. Marco teórico metodológico

3.1. Introducción

A diferencia de los modelos descriptivos de los usos de suelo como el de anillos concéntricos de Burgess (1929), el de sectores de Hoyt (1939) y de núcleos múltiples de Harris y Ulman (1945), los cuales a pesar de que en su implementación se estudia la estructura espacial urbana, han sido reemplazados por métodos en cuyos fundamentos teóricos analizan las relaciones complejas que se llevan a cabo en las ciudades.

De acuerdo con Buzai et al. (2015), en la segunda mitad del siglo XX se impulsaron las prácticas relacionadas con la simulación de procesos urbanos debido a los avances experimentados por la informática y los sistemas de información geográfica como respuesta al crecimiento ciudades.

En el presente capítulo se realiza una breve recopilación y un análisis de conceptos relacionados tanto a las características de los sistemas generales, de la complejidad y los sistemas complejos; así como la interdisciplinariedad y la aplicación del pensamiento complejo en las ciencias sociales.

Finalmente, se hace una revisión a las técnicas de inteligencia artificial y de las características generales de la simulación prospectiva para representar los sistemas complejos.

3.2. Sistema

Para el concepto de sistema, durante la primera mitad del siglo XX se llega a los avances que marcarían el rumbo de la Teoría y de lo que evocaba los sistemas, ya que fue el periodo en el que los conceptos se emplearon en el proceso científico.

Dicho lo anterior autores añadieron aportes al acervo tales como Parsons, que en 1937 en su texto “La estructura de la acción social” usa conceptos como estructura, función, tensión y sistema; el botánico Stanley implementa el término de ecosistema en el año 1935. Otro ejemplo se da con la publicación de la teoría de la Gestalt, la cual aporta elementos para la comprensión de la visión sistémica, entre otros.

No obstante, es hasta 1945 en el que Bertalanffy concentra y articula todos estos conceptos desarrollando la Teoría general de sistemas (A, Flores y J, Thomas, 1993: 116). En ese texto se define a un sistema como un “complejo de componentes que interactúan los cuales sus conceptos están relacionados a totalidades organizadas” (Bertalanffy, 1989: 94).

Más adelante, en la misma obra el autor añade características a su primera definición, de modo que se trata de un “conjunto de partes coordinadas y en interacción para alcanzar un conjunto de objetivos” (Bertalanffy, 1989: 263).

Según la RAE (2018) indica que es un conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí o bien, se refiere a un conjunto de cosas que relacionadas entre sí de forma ordenada contribuyen a determinado objeto.

Para Flores y Thomas (1993:119), similar a lo mencionado por Bertalanffy, mencionan que los sistemas representan un conjunto de elementos en interacción dinámica los cuales se encuentran organizados jerárquicamente en función de un fin.

Las definiciones anteriormente expuestas comparten elementos en común y algunos puntos de divergencia, por lo tanto se emplea la definición que brinda Domínguez y Santillán, la cual, se obtuvo a partir de un exhaustivo trabajo de homologación de definiciones encontradas en la literatura. Para Domínguez y López (2016: 127) se trata de:

“conjunto de elementos que suman esfuerzos colaborando de manera coordinada y con una constante interacción para alcanzar objetivos en común, es identificable por una frontera que lo delimita y se encuentra operando en un ambiente o entorno con el cual puede guardar una estrecha relación; cada uno de estos elementos puede a su vez, ser un sistema de menor complejidad o tamaño llamado subsistema, y por el contrario cada uno de esos sistemas pueden ser un elemento de un sistema más grande o supersistema”.

3.3. Conceptos básicos de los sistemas

Siguiendo a Arnold y Osorio (1998) en conjunto con Osorio (2008) entre los conceptos que definen a un sistema destacan los siguientes aspectos, que con la finalidad de distinguirlas fueron resaltados en negritas:

Primeramente, se encuentran constituidos por entradas, salidas y procesos; con **entradas** se refiere a insumos, energía e información que el sistema recibe los cuales son necesarios

para su funcionamiento y mantenimiento. Las **salidas** son los productos o servicios principales y secundarios que el sistema entrega al medio, como resultado directo o indirecto de su proceso de transformación.

Mientras tanto los **procesos** son las actividades y/o transformaciones que se llevan a cabo en el sistema con sus elementos de entrada, para obtener las salidas. Por otro lado los **elementos**, son aquellos objetos y/o procesos constituyen al sistema; una vez identificados pueden ser organizados en un modelo.

Las **relaciones** son útiles en cuanto a la comprensión del comportamiento del sistema, estas pueden ser recíprocas o unidireccionales. Así mismo, la **estructura** la definen las interrelaciones con un cierto grado de estabilidad entre las partes o componentes de un sistema en un momento dado.

Para delimitar los **límites** según García (2006:48) se debe considerar tanto a la problemática que se va a estudiar en conjunto con el aparato conceptual, además de otros factores con sus escalas espaciales y temporales. En contrapuesta, el **ambiente** se entenderá como el área en la cual están presentes condiciones y sucesos que influyen en el comportamiento del sistema.

Otra cualidad es la **sinergia**, que se refiere a que el estudio de sus componentes en forma aislada no puede explicar o predecir su comportamiento; la sinergia surge de las interacciones entre las partes o componentes de un sistema. Otra característica es la **retroalimentación**, se da en los sistemas de tipo abierto y existen dos tipos: la positiva o negativa.

Otro concepto es el de **emergencia**, se trata de la generación de nuevas y/u otras propiedades de los sistemas las cuales surgen tras el proceso de interacción entre los elementos que componen.

Finalmente, un **subsistema** es un conjunto de elementos y relaciones que responden a funciones específicas dentro de un sistema mayor; estos subsistemas están en constante interacción y poseen las mismas propiedades que los sistemas.

3.4. Tipos de sistemas

Existe una variedad de tipos de sistemas, homologar y establecer su clasificación sería una tarea que excede los alcances de este trabajo, por lo que se expondrá la distinción expuesta por Flores y Thomas (1993:125) en la cual se basan en la finalidad de cada sistema:

- Según la materialidad del objeto de estudio: físicos y abstractos. Los primeros se diferencian por poseer elementos o componentes tangibles, por otro lado, se basan en ideas, pensamientos, imaginarios, entre otros.
- Según su comportamiento: Deterministas y probabilísticos. Los deterministas se caracterizan por la capacidad de predictibilidad de los comportamientos y los probabilísticos, se diferencian por la probabilidad de los mismos.
- Según su grado de complejidad: De Simples a Complejos. Este agrupamiento se define dependiendo del grado de complejidad de las interrelaciones que se llevan a cabo en dichos sistemas.
- En relación con su entorno: Cerrado o abiertos. Los primeros no tienen intercambio de materia y energía con el entorno, al contrario con lo que sucede con los abiertos, ya que existe una constante interacción con el ambiente por medio del intercambio de energía, recursos, información y/o materia con su medio.
- Según su organización: Organizados y auto organizados. Los organizados son aquellos que no tienen la capacidad de auto dirigirse y son gobernados por agentes externos, en contrapuesta, los auto organizados son aquellos sistemas que cuentan con capacidad propia de dirigir, modificar y corregir sus actos, característico de las sociedades y sus manifestaciones sociales culturales.

Para esta tesis, los métodos y técnicas empleados se fundamentan en las características de los sistemas complejos y auto organizados, ya que se caracterizan por estar compuestos por elementos independientes relacionados de las que surgen estructuras estables. En breve se exponen los atributos referentes a este tipo de sistemas y de lo que comprende la complejidad.

3.5. Pensamiento sistémico

Para fines prácticos se emplea el término de pensamiento sistémico para referirnos al conjunto de principios e ideas, las cuales a partir de la implementación de herramientas informáticas, permiten la simulación del comportamiento de realidades físicas, naturales, sociales y culturales (Anzurutia y Campos, 2012:193).

Continuando con el análisis de Anzurutia y Campos (2012), el sustento teórico se da con la concepción de totalidad (relativa) capitalizada en la modelización tanto del comportamiento para llegar a las manifestaciones y fenómenos asociados al sistema y/o como red de sistemas simulados.

3.6. Complejidad

Hasta la actualidad, el término de complejidad se ha conceptualizado desde diversas posturas teóricas, las cuales han generado una gama de definiciones. De modo que en este apartado se describen las cualidades principales para caracterizar de forma global a la complejidad.

Dicho lo anterior, basándonos en el Arnold y Osorio (1998) asocian este término a la cantidad de elementos de un sistema, a su vez, sus potenciales interacciones y el número de estados posibles que se producen a través de éstos (variedad, variabilidad).

Para Flores y Thomas (1993: 124) la complejidad se expresa en características cuantitativas como la composición del sistema y las características cualitativas de sus elementos y de sus interacciones. A esto se le añade el factor de aleatoriedad proveniente de la incertidumbre del entorno del sistema. También, se toma en cuenta las relaciones entre determinismo y azar aparentes, es decir, entre el orden y el desorden.

De acuerdo con Batty (2005) probablemente no haya una definición satisfactoria de complejidad no obstante es una característica de los sistemas que son intrínsecamente impredecibles.

Así mismo persuade acerca de que las ideas sobre la complejidad se han estado desarrollando durante diferentes periodos. Uno de los principios centrales de los sistemas generales de la teoría de sistemas proveniente de la biología y la física en la década de 1930 es la de la definición del que el todo es más que la suma de las partes.

Con esto, un objeto completo no se puede explicar simplemente sumando sus componentes, tal como se buscaba en las ciencias con los métodos reduccionistas. Las ideas actuales sobre la complejidad no se apartan de la antigua noción de que los sistemas sin embargo contemplan otros aspectos para comprender el todo. Con esto se pasa de un análisis centrado en la estructura del sistema a uno en donde se reconoce la importancia del comportamiento de las relaciones que se llevan a cabo.

La dinámica dentro de los sistemas complejos es la materia prima puesto que, de esto derivan los estados que lejos del equilibrio, manifiestan modificaciones que van desde cambios periódicos hasta catastróficos y caóticos. Con este enfoque la idea los sistemas pasan de ser explicados en términos estáticos.

Con metodologías basadas en la complejidad se pueden estudiar sistemas que evolucionan y cuyos comportamientos varían cualitativamente y cuantitativamente en función de la retroalimentación y la emergencia, de modo que nuevas y variadas formas y patrones emergen de reglas simples.

En síntesis, esta propiedad surge como respuesta para comprender a aquello que pudiera ser aleatorio e impredecible, por lo tanto resulta ser una cualidad inherente presente en todos los sistemas; con características diferentes a lo que corresponde al término de complicado relacionado más a cualidades de dificultad, confuso, entre otras.

3.7. Uso de enfoque complejo en ciencias sociales, estudios urbanos y dispersión urbana

El uso del enfoque complejo en este trabajo, se justifica en primera instancia en función del objeto de estudio en cuestión, la ciudad retomando lo mencionado por Quintana (2008: 81), se concibe como un sistema en el que se convive en el orden y desorden proveniente de las relaciones entre sus componentes.

Este es el espacio en el que las ciudades adquieren una estructura dinámica y coherente resultante de la acción de numerosas decisiones individuales generando de esta forma una organización global, la cual se encuentra constituida por las interacciones que se llevan a cabo en el interior y de esta con su entorno.

Una segunda consideración se basa en la interdisciplinariedad patente de este enfoque, por interdisciplinariedad entendemos como “una forma de organización de los conocimientos en donde los métodos que han sido usados con éxito en una disciplina, se transfieren a otra” (Laguna et al. 2016:21).

Dicho lo anterior, tanto los paradigmas globales de la complejidad como de los algoritmos para modelar los procesos servirán como un instrumento de análisis de los procesos que tienen lugar en un sistema que determinamos de carácter complejo; de esta forma se podrá llegar a otro nivel de comprensión en el que se tenga los elementos para caracterizar los comportamientos y de esta forma proveer la evolución del objeto de estudio como totalidad organizada.

No obstante, debemos tener en cuenta lo mencionado por Méndez (2018: 89) acerca de las investigaciones interdisciplinarias, ya que por un lado confirma que se trata de estudios que requieren el uso del paradigma de los sistemas complejos, pero por otro, esto no sustituye la utilización y el desarrollo de estudios especializados.

Finalmente, la capacidad de simulación de las condiciones del sistema permitirá integrar la naturaleza compleja de los comportamientos y problemas en el desarrollo de las ciudades desde nuevos niveles de observación.

3.8. Teorías de la complejidad

Se han realizado una variedad de clasificaciones de teorías que se engloban dentro de las Teorías de la complejidad, ya sea según las etapas, de las corrientes o las generaciones. Para la exposición de las teorías notorias se eligió la clasificación propuesta por Jones (2008).

Ésta clasificación destaca por ser una de las más recientes y que destaca por contrastar clasificaciones realizadas; como resultado se obtiene una clasificación de tres generaciones ordenadas de forma cronológica (Jones, 2008 citado en Solana y Ruiz, 2013), cada una de las teorías mencionadas fueron resaltadas.

La primera generación está conformada por las **teorías de la información y la comunicación** desarrolladas a partir de la teoría matemática de la comunicación, formulada por Claude Shannon en 1949. Otro punto fue el de las primeras investigaciones con

autómatas celulares las cuales tomaron impulso por medio de John von Neumann en la década de 1940. Después, las **redes neuronales** las cuales se derivan de las investigaciones de Marvin Minsky de 1951; así mismo, los primeros trabajos referentes con la **cibernética** con el matemático Norbert Wiener en la década de los 40.

La segunda generación de teorías de la complejidad se compone por **ciencias de la computación** con sus derivaciones de complejidad computacional y complejidad algorítmica. Otra es la **inteligencia artificial** fundamentada con los trabajos de Herbert Simon acerca de los procesos de toma de decisión en el ámbito de las organizaciones administrativas.

Por otra parte se encuentra la **teoría de los sistemas** propuesta del biólogo von Bertalanffy en 1968; las **teorías de la auto organización** en la década de 1950 la cual se sustentó con el bagaje adquirido desde cibernética, la teoría de sistemas y la teoría de los autómatas; la auto organización del tipo viviente fue investigada por el químico Ylia Prigogine y fue el que ligó este ámbito con el de la termodinámica.

Al mismo tiempo, se da un crecimiento en cuanto al estudio de las **dinámicas no lineales** puesto que con el avance de la informática se dio el incremento de las capacidades técnicas para llevar a cabo las simulaciones informáticas.

Como se afirmó arriba, esto da pie a las investigaciones de la década de 1970 con Rene Thom y la **teoría de las catástrofes** en la que se estudiaba las discontinuidades y/o transiciones que ocurren durante la evolución de los sistemas. Algo semejante ocurre con la **teoría del caos** y la **teoría de los fractales** ideadas en la misma década.

Continuando con la clasificación propuesta por Jones (2008), la tercera generación se conforma por las **Ciencias de la complejidad** y de las cuales se derivan los trabajos prácticos como los de **sistemas complejos adaptativos**, de Chris Langton y la **Vida Artificial**; las de John H. Holland (1995) con **algoritmos genéticos**; las de Stuart Kauffman y las **redes booleanas** de Turing; entre otros.

En esta última generación destaca por el papel que ha desempeñado el uso de la capacidad de procesamiento de las computadoras, puesto que, su utilización constituye la herramienta

de investigación dada la capacidad de manipulación de una gran cantidad de datos en conjunto con la posibilidad de modelar y simular sistemas complejos.

3.9. Sistemas complejos

Una vez realizado el análisis conceptual tanto de los sistemas en general, de la complejidad y del conjunto de teorías que han abarcado los problemas de esa naturaleza, conviene ahora examinar los sistemas complejos, por lo que se expone desde la perspectiva del físico Rolando García.

De acuerdo con García (2006:60) los sistemas complejos son sistemas de tipo abierto los cuales se forman por un número de entidades simples fuertemente relacionados entre sí, caracterizados por carecer de límites definidos y realizar intercambios con el medio externo, de manera que su comportamiento global genera propiedades emergentes complejas.

Por lo tanto, los intercambios o relaciones evocan el término “emergente”, el cual se revisó anteriormente, pero conviene retomarlo bajo este contexto. Dicho con lo anterior, se refiere al proceso de formación de un sistema complejo a partir de algunas reglas sencillas, regulados por reglas microscópicas y principios generales de organización en función de las relaciones entre los individuos y el ambiente (Quintana, 2008).

En este tipo de sistemas convergen múltiples procesos en los que las interrelaciones constituyen la estructura que funciona como una totalidad organizada, donde la heterogeneidad de los elementos y/o subsistemas que lo componen provienen del campo de diversas ramas de la ciencia y la tecnología. Esta heterogeneidad de componentes se caracteriza por la interdefinibilidad y mutua dependencia para el funcionamiento del sistema principal (García, 2006: 87).

Quintana (2008) añade que los sistemas adquieren complejidad al aumentar el número de componentes e interconexiones entre ellos, este comportamiento colectivo representa un nivel superior en la evolución del sistema, de ahí que, se potencie el surgimiento de nuevos estados. Sin embargo, advierte que tener un gran número de interacciones no garantiza un comportamiento emergente.

Así, por ejemplo, un gran número de interacciones pueden ser el factor que evite la formación de un comportamiento emergente y es necesario la existencia de diferentes umbrales de diversidad, organización y conectividad. En síntesis, es de relevancia que las interacciones estén organizadas (Quintana, 2008: 76).

Adicionalmente, en el documento maestro de la Maestría en Ciencias de la Complejidad (MCC) (2014:28) indica que lo primordial para el uso de los sistemas complejos no es únicamente analizar la integración de sus partes, sino que son el aparato teórico y metodológico para comprender las propiedades emergentes, dado que se contempla el comportamiento colectivo, dinámico y no lineal, el cual es distinto al que presentan por separado los componentes de dicho sistema.

Finalmente, Batty (2005) dada la naturaleza de las relaciones, nos persuade acerca de la simulación de sistemas complejos involucra procesos cuyos resultados no podemos predecir sin realmente participar en la simulación. La incapacidad proviene de la imposibilidad de sumar una multiplicidad de interacciones locales dentro de una multitud de objetos que interactúan, de modo que no hay forma en que los métodos tradicionales de análisis puedan utilizarse para permitir la predicción de su comportamiento; la simulación es el único recurso.

En resumen, una definición de un sistema complejo en este contexto es aquel que se basa en reglas simples o interacciones que dan lugar a resultados espaciales imprevistos. Se trata de sistemas emergentes cuya propiedad es la espontaneidad en el sentido de que todas sus partes comienzan a alcanzar una orden global simultáneamente. Otra característica es la auto organización en la que los patrones globales emergen de la acción de los procesos locales.

Por lo tanto, reglas locales basadas en una interacción limitada con vecinos inmediatos pueden generar efectivamente un orden global de un tipo que no se puede anticipar. Dicho lo anterior, Anzurrutia y Campos (2012:45) nos persuaden acerca de la utilización en cuanto a la comprensión y análisis de situaciones donde:

- La naturaleza de las relaciones entre los elementos que configuran el problema es heterogénea

- Exista una alta dependencia mutua en relaciones múltiples de los componentes del objeto de estudio
- Haya una serie relaciones implícitas, las cuales sean visibles en momentos particulares derivados de la emergencia de una nueva propiedad.

3.10. Técnicas de inteligencia artificial

Se inicia definiendo lo que corresponde a la palabra inteligencia, la RAE (2019) indica que se trata de la capacidad de entender, comprender o de resolver problemas; así mismo, considera a lo artificial como aquello que es generado o producido por el ingenio humano.

A su vez, se concibe a la inteligencia artificial (IA) como una “disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos que ejecutan operaciones comparables a las que realiza la mente humana, como el aprendizaje o el razonamiento lógico” (RAE, 2019).

Del mismo modo, Palma y Marín (2008:35) al tratar de tipificar la IA la describen como: “conjunto de técnicas, métodos, herramientas y metodologías que nos ayudan a construir sistemas que se comportan de manera similar a un humano en la resolución de problemas concretos”.

Por otro lado, Romero et al. (2007:10) establece una distinción para lo que se incluye dentro de la IA desde dos perspectivas; desde la ciencia y desde la ingeniería. La primera se entiende como la ciencia cuyo objetivo es el estudio de la inteligencia en los elementos artificiales; por el contrario, como ingeniería se centra en la generación o creación de elementos que contengan un comportamiento inteligente.

Por lo tanto, en este apartado se hace una revisión a los autómatas celulares, siendo empleadas en los procesos de modelización y simulación de una variedad de procesos, cuyo sustento teórico son los paradigmas globales de la complejidad que se mencionaron anteriormente.

Una vez expuestas las características principales, se desarrolla un análisis comparativo para examinar las posibilidades que ofrecen los autómatas celulares para el desarrollo esta tesis tomando en consideración la temática bajo estudio (crecimiento urbano).

3.10.1. Autómatas celulares (AC)

Los AC se crean en la primera mitad del s. XX, a partir de los trabajos de Stanislaw Ulam y de las investigaciones relacionadas con sistemas autorreproductivos desarrolladas por John von Neumann, partiendo de la hipótesis de generar herramientas que pudieran imitar ese tipo de comportamientos.

De acuerdo a la RAE (2019) un autómatas es una máquina, instrumento o aparato que reproduce tanto la figura como los movimientos de un ser animado. Por otra parte, una célula, en el contexto de la biología, se define como la unidad fundamental.

Sancho (2016) y Vivanco (2008: 18) definen a las AC como modelo matemático de un sistema dinámico discreto compuesto por un conjunto de células (celdas) que adquieren distintos estados o valores.

Sistema debido a que para su funcionamiento se requiere la interconexión de forma organizada de los componentes; **dinámico** ya que la interacción se lleva a cabo en momentos sucesivos y **discretos**, puesto que las transiciones y/o cambios de estados se dan en unidades de tiempo finitas de enteros a intervalos regulares, además, para que el conjunto de células logre a cabo una evolución se requiere de una determinada expresión matemática, llamada regla de transición local.

Finalmente, una cualidad notoria de las AC es la sensibilidad a la que están expuestos los estados de las células en relación a sus propiedades en periodos anteriores y la correspondencia con celdas vecinas.

Resumiendo, para fines prácticos, en esta investigación se hace uso de los autómatas celulares; ya que, se han aplicado de manera frecuente, entre otros usos más, en los ejercicios de previsión espacial (Rahim, 2016). Por otro lado, un autómatas es parte fundamental para construir modelos basados en sistemas complejos, ya que con el uso de estas herramientas se puede llevar a cabo el modelado de dinámicas e interacciones espaciales para la espacialización de escenarios prospectivos de forma simple. Por lo tanto toca examinar las características principales de los autómatas celulares.

Características de los autómatas celulares

Siguiendo con Vivanco (2008: 19) y Hernández (2008), las AC se pueden explicar a partir de cuatro principales características:

Espacio celular/ arreglo

Cada división homogénea del arreglo espacial es llamada célula (celda), estas se encuentran rodeadas por otras células las cuales conforman arreglos espaciales regulares a los cuales se les conoce como retícula. Las retículas pueden ser representadas como líneas, planos cartesianos o en arreglos en espacio r -dimensional.

Estado del sistema

Un estado, de acuerdo con la RAE (2019), es la situación en la que se encuentra algo relacionado con modos sucesivos de ser o estar. Aplicando esta condición a los sistemas, los estados son finitos, por lo que cada célula dentro de un espacio o arreglo toma un valor de este conjunto de estados en un determinado periodo de tiempo.

Tipos de vecindad

Una vecindad según Sancho (2016), se define como el subconjunto de células adyacentes a una dada, por lo tanto se toma como referencia la posición relativa respecto a ella. Para Hernández (2008), la vecindad de una célula es cualquier subconjunto de células de la retícula con las que el individuo tiene contacto.

Por lo tanto, se trata de una correspondencia entre la célula y su entorno, en la cual, las celdas en la vecindad de la celda x puede influenciar el estado de esa celda en la siguiente generación.

Dicho en otras palabras, cuando una celda entra en contacto con alguna otra, siendo esta última ubicada en el subconjunto de células que configuran la vecindad para un período determinado, da como resultado de esa acción la posibilidad de que el estado de las células cambie.

Se han realizado numerosas investigaciones con una gran variedad de configuraciones, sin embargo, en lo que corresponde a este trabajo, solo se exponen las características de tres tipos de vecindad propias de los espacios bidimensionales; entre ellas: la vecindad de von Neumann (figura 3.1), la vecindad de Moore (figura 3.2) y la vecindad extendida de Moore (figura 3.3).

La vecindad von Neumann consiste en cuatro células más cercanas a la célula, las cuales se ubican al norte, sur, este y oeste.



Figura 3.1. Vecindad de von Neumann

La vecindad Moore consiste en las ocho células más cercanas, por lo tanto, a diferencia de la propuesta por von Neumann, esta posee cuatro celdas adicionales en los ángulos noroeste, noreste, suroeste y sureste.



Figura 3.10. Vecindad de Moore

Finalmente, la Vecindad de Moore extendida a más de un anillo, está constituida por 24 células adyacentes, las cuales se configuran a partir de añadir una un borde de una célula a la configuración original de Moore.



Figura 3.3. Vecindad extendida de Moore

En resumen, para un autómata celular de 2 dimensiones, la vecindad es el subconjunto de células de la retícula, la cual tendrá la característica de ser uniforme e isomorfa (es decir, con la misma estructura).

Regla/función de transición

Son las reglas (o regla) de evolución que origina el comportamiento del AC en la siguiente generación en función de su estado y el de las celdas en su vecindad en la generación actual. Es decir, los estados futuros están demarcados por el estado pasado inmediato.

Los autómatas celulares al ser sistemas dinámicos con la característica de evolucionar en pasos fijos de tiempo, se deberá establecer la configuración inicial, que consiste en la asignación de un estado a cada una de las células del espacio (Sancho, 2016).

Posteriormente, por medio de una expresión algebraica o un grupo de ecuaciones se provee el medio para analizar la vecindad y aplicar las reglas de transición que conducen a cambios de estado en el espacio celular.

Fronteras

En los arreglos o espacios celulares infinitos no se contempla las limitaciones en el espacio físico, por lo que en este tipo de disposición las restricciones se basan en la capacidad y el rendimiento de las computadoras; de ahí que se opte por usar arreglos finitos (Hernández, 2008: 6).

Una de las situaciones que surgen de aplicar espacios celulares de dos dimensiones finitas, es el de definir las características que poseerán las celdas ubicadas en los bordes de la retícula. De ahí que se hayan propuesto, de acuerdo con la naturaleza del objeto de estudio a modelar, configuraciones que se concentran en 4 tipos de frontera (Reyes, 2011):

- Frontera Abierta: En este tipo de frontera se considera a todas las células fuera del espacio del autómata con solo un valor fijo.
- Frontera Refleitora: Las células ubicadas fuera del espacio del autómata toman los valores que están dentro, es decir, se reflejan los valores de las células del interior del arreglo.
- Frontera Periódica: Las células que están en la frontera interactúan tanto con los vecinos inmediatos en el interior del arreglo como de las células que están en el extremo opuesto del arreglo. En el caso de los arreglos de una dimensión se visualiza como una

circunferencia, por otra parte, en una disposición bidimensional se concibe en una figura toroidal.

- Sin Frontera: Se aplica cuando la representación de autómatas no tiene límites y por lo tanto es infinito; este tipo de frontera es viable a través del uso de un equipo de cómputo apto y con un software que simula la evolución del sistema.

No obstante, dentro del campo de los autómatas celulares y en específico para las aplicaciones de simulación de crecimiento urbano se tiene una amplia variedad de modelos basados en AC con entornos y características comunes o específicas.

Entre los más comunes se encuentra: SLEUTH (Pendiente, uso de suelo, excluidos, urbano, transportes y sombreado), DINAMICA, GEOMODO, MOLAND (Monitoreo dinámico de la cubierta del uso de suelo), LCM (modelador de cambio de suelo), DUEM (modelo evolutivo urbano dinámico), CLUE (Conversión del uso de suelo y sus efectos), entre otros (Rahim, 2016).

De esta forma ha surgido una numerosa colección de propuestas de entre las cuales destaca el modelo de White (1996), este se caracteriza por emplear las cualidades de simplicidad y versatilidad, esto con el objetivo de representar a los sistemas dinámicos, evolutivos y a la vez auto organizados. Este modelo conjuga, el nivel descriptivo capturado en los Sistemas de Información Geográfica y el medio para la simulación cuyo modelo genera configuraciones complejas.

Además, en el modelo de White se emplea una característica básica e inherente de los análisis espaciales, esa es la de autocorrelación espacial o también conocida como la primera ley de Geografía de Waldo Tobler que establece que “todo está relacionado con todo, pero las cosas próximas entre sí están más relacionadas que las distantes” (en Olaya, 2014: 245).

3.10.2. Modelo de Roger White (1996)

Para este modelo primeramente se debe definir las dimensiones en un arreglo finito, el cual sirve para la representación del área de estudio; en segunda instancia se establecen las cualidades heterogéneas de las celdas, teniendo en cuenta de que cada estado de la célula equivale a uno de los usos de suelo a analizar.

Los usos de suelo en este modelo se clasifican en dos tipos, los activos y los fijos. Los primeros tienen la probabilidad de transformar su estado durante el proceso de simulación y se usan para representar a los usos de suelo dinámicos como lo es el urbano, el agrícola, el pastizal, entre otros.

Por el otro lado, los fijos, son aquellos que no cambian (en un tiempo corto) o cuyos rasgos se consideran como permanentes, estos a pesar de su condición afectan las probabilidades de transición de los estados activos. Se emplean para representar geometrías particulares como es el caso de los cuerpos de agua, áreas verdes o las vías de comunicación (carreteras, caminos, vías férreas).

Al referirse a este modelo como un arreglo heterogéneo, se debe a que las células además de representar al estado también lo hacen con un conjunto de valores fijos los cuales denotan la idoneidad de cada celda para cada uno de los usos de suelo activos.

En las iteraciones para cada celda no ocupada por un estado fijo, se lleva a cabo el cálculo de los estados en los que podría convertirse la célula, incluyendo el estado actual de la celda.

Estas transiciones se basan en primer lugar en la aptitud intrínseca de la célula para cada uno de los usos de suelo activos y, en segundo lugar, en la relación con los distintos usos de suelo de las celdas próximas o vecinas, de forma que algunos usos de suelo como vecinos pueden resultar incompatibles o viceversa, que se refuercen mutuamente.

Otro rasgo de este modelo es la capacidad analizar comportamientos no deterministas, ya que aunque las variables que anteriormente se mencionaron corresponden a factores predecibles o predefinidos, se incluye el efecto de una perturbación estocástica, es decir de eventos o elementos caracterizados por el factor aleatorio.

Las reglas de transición definen el estado de la célula o celda en un tiempo determinado, es expresada en términos de operaciones matemáticas, para este modelo el cálculo de las transiciones potenciales se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$P_{hj} = VS_j \left(1 + \sum_{k,i,d} m_{kd} I_{id} \right) + H_j$$

Donde:

- P_{hj} = Es el potencial de transición del estado h al estado j
- m_{kd} = Es el parámetro de ponderación aplicado a la célula en un estado k ubicadas a una distancia d de la celda central. Para este índice se debe tomar en cuenta la importancia de la cercanía celda central y la compatibilidad entre los distintos usos de suelo.
- I_{id} = Es el parámetro cuya función es contabilizar las ponderaciones de las celdas (m_{kd}) en la posición (i, d) con un estado k ; i corresponderá a la suma de las celdas situadas dentro de un radio d a la celda central. Sera $I_{id} = 1$ cuando el estado de la celda $i=k$, de lo contrario, $I_{id} = 0$.
- H_j = Es un parámetro inercial, del cual depende de la probabilidad de que una celda en su estado actual. $H_j > 0$ si $j=h$, por otro lado, $H_j = 0$.
- S_j = Es la idoneidad del estado de la célula j , del cual $0 \leq S_j \leq 1$
- V = Es un término de perturbación estocástica. Calculado por medio de la ecuación:

$$v = 1 + (-\ln(r))^\alpha$$

En el cual r es una variable uniforme y aleatoria cuyos valores se encuentran entre 0 y 1; α será el parámetro usado para ajustar el tamaño de la perturbación.

- a_j = Es el parámetro de accesibilidad para cada célula, calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$a_j = \left(1 + \frac{D}{\delta_j} \right)^{-1}$$

- En donde δ_j es un coeficiente que expresa la relevancia de la accesibilidad para la actividad del uso de suelo j .
- En cuanto a D , este corresponde a la distancia euclidiana entre la celda central y la celda con uso de suelo fijo más cercana, para su cálculo se emplea la ecuación:

$$D(P_1P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Finalmente entre los aspectos a considerar antes y durante el proceso de simulación es el hecho de que:

- La accesibilidad se define únicamente de forma local, teniendo en cuenta la distancia a las redes viales
- Las vías de comunicación se representan como una red superpuesta en el arreglo celular
- Cada celda activa tiene la oportunidad mayor a cero de transición a excepción del estado prohibitivo por idoneidad
- La ponderación se diferencia según el propio estado de la célula central y la relación de distancia con las celdas vecinas. Por lo tanto células cercanas por lo general tendrán un mayor factor de peso de influencia en contraste con aquellas que se ubiquen alejadas, cabe mencionar la condicionante de la compatibilidad de usos de suelo, ya que la ponderación positiva se dará siempre y cuando los usos sean acordes, pero serán negativos si corresponden a estados discordantes.

3.11. Conclusión

La simulación por medio de modelamiento en contextos de complejidad es una tarea novedosa, el trabajo resultante de la implementación de las computadoras no operaría sin el conocimiento previo y el estudio del objeto en cuestión conceptualizado como sistema complejo.

En esta investigación se opta por emplear el modelo de Roger White (1996), el cual para su funcionamiento requiere la aplicación de los autómatas celulares, posibilitando construir el modelo procesando las propiedades de los usos de suelo del área de estudio, los cambios en el tiempo, las relaciones de estos de acuerdo con la autocorrelación espacial.

La regla de transición evalúa aspectos como las conveniencias geográficas entre usos de suelo, efectos que sobre los usos colindantes, la accesibilidad y la aleatoriedad de las decisiones en el sistema.

Evidentemente los ejercicios de modelación conllevan una abstracción y simplificación del sistema real, no obstante al emplear un modelo cuyo fundamento teórico se basa en las ciencias de la complejidad nos posibilita una aproximación al objeto de estudio con resultados que difícilmente se podrían obtener a través de métodos tradicionales.

Por otro lado, el empleo de técnicas de inteligencia artificial como la metodología desarrollada por Roger White basada en Autómatas Celulares permite la comprensión del crecimiento urbano como un proceso irregular, producto de las relaciones internas y externas en un sistema abierto no lineal.

Así mismo, bajo esta metodología se conjunta la capacidad de los SIG de plasmar e integrar la complejidad de la dimensión espacial, en conjunto con la visión prospectiva como resultado de la capacidad de los ordenadores y los algoritmos para la simulación de múltiples relaciones simples entre los componentes espaciales que actúan en la dinámica del sistema urbano complejo adaptativo (ciudad).

Bajo este paradigma, en el estudio de las ciudades se incluye características inherentes como lo es la organización global a partir de acciones locales y en función de elecciones individuales, es decir, la auto organización; de la habilidad de adaptarse a influencias externas desarrollando capacidades adaptativas; de la cualidad de mantener su estabilidad interna mediante procesos de equilibrio dinámico y finalmente el estudio de la morfología emergente a partir de decisiones espaciales simples.

Otra de las ventajas de analizar las ciudades con un enfoque sistémico es el abordar el objeto de estudio no únicamente desde el punto de vista espacial y temporal, sino se añade la perspectiva funcional u organizacional, la cual permitirá formular una aproximación alternativa con posibilidades para influir en la dinámica del sistema.

Con la finalidad de resumir las ideas plasmadas hasta este momento se ha realizado el siguiente cuadro resumen con la descripción de las ideas principales:

Sistema		
Definición	Características	Tipos
-Conjunto de elementos en interacción dinámica los cuales se encuentran organizados jerárquicamente en función de un fin, los cuales sus conceptos están relacionados a totalidades organizadas.	-Compuesto por elementos, entendido a través sus relaciones definiendo una estructura. -Identificable por una frontera y operando en un ambiente -Constituidos por entradas, salidas y procesos -Entendido desde la sinergia y la emergencia de nuevas propiedades.	-Físicos (componentes tangibles) y abstractos (imaginarios) -Deterministas (predictibilidad) y probabilísticos (probabilidad) -Simples a Complejos (según grado de complejidad de las interrelaciones). -Cerrado (no intercambio con el entorno) o abiertos (constante interacción) -Organizados (no capacidad de auto dirigirse y gobernados por agentes externos) y auto organizados (capacidad propia de dirigir, modificar y corregir sus actos).
Complejidad		

Definición	Características	Teorías
-Se expresa en características cuantitativas como la composición del sistema y las características cualitativas de sus elementos y de sus interacciones, más el factor de aleatoriedad proveniente de la incertidumbre del entorno del sistema. Toma en cuenta las relaciones entre determinismo y azar aparentes.	-El objeto completo no se explica sumando sus componentes, se centra en el estudio de la estructura del sistema a través de relaciones que se llevan a cabo. Se puede estudiar sistemas que evolucionan y cuyos comportamientos varían cualitativamente y cuantitativamente en función de la retroalimentación y la emergencia, de modo que nuevas y variadas formas y patrones emergen de reglas simples.	-Primera generación: Autómatas celulares (1940) Redes neuronales (1951) Cibernética (1940) Teorías de la información (1949) -Segunda generación: Ciencias de la computación (1960) Inteligencia artificial (1956) Teoría de los sistemas (1968) Teoría de la auto organización (1950) -Tercera generación: Ciencias de la complejidad (1980) Sistemas complejos adaptativos (1992) Vida artificial (1990) Algoritmos genéticos (1995).
Sistemas complejos		
Definición	Aplicaciones	Técnicas de inteligencia artificial
-Se basan en reglas simples o interacciones generando resultados espaciales imprevistos. Son sistemas emergentes y auto-organizados en la que los patrones globales emergen de la acción de los procesos locales. Con reglas locales basadas en una interacción limitada con vecinos inmediatos pueden generar un orden global.	-Cuando la naturaleza de las relaciones entre los elementos que configuran el problema es heterogénea -Exista una alta dependencia mutua en relaciones múltiples de los componentes del objeto de estudio -Se dé una serie de relaciones implícitas, las cuales sean visibles en momentos particulares derivados de la emergencia de una nueva propiedad.	-La simulación permite sumar una multiplicidad de interacciones locales dentro de una multitud de objetos que interactúan y puedan utilizarse para permitir la predicción de su comportamiento. Siendo las IA conjunto de técnicas, métodos, herramientas y metodologías que ayudan a construir sistemas cuyo sustento teórico son los paradigmas globales de la complejidad, de entre los que destaca las autómatas celulares.
Autómatas celulares		
Definición	Características	Modelo de Roger White
Modelo matemático de un sistema dinámico discreto compuesto por un conjunto de células (celdas) que adquieren distintos estados o valores. Su funcionamiento requiere la interconexión de componentes; los cambios de estados se dan en unidades de tiempo finitas, requiere de una determinada regla de transición local y una cualidad notoria es la sensibilidad de los estados de las células en relación a sus propiedades en periodos anteriores y la correspondencia con celdas vecinas.	-Espacio celular o arreglo: líneas, planos cartesianos o en arreglo r-dimensional -Estado del sistema: Conjunto de estados en un determinado periodo de tiempo. -Vecindad: Vecindad von Neumann, Moore y Moore extendida -Regla/función de transición: Expresión algebraica o un grupo de ecuaciones -Frontera: Abierta, reflectora, periódica y sin frontera.	Modelo basado en Autómatas Celulares compuesto por dimensiones en un arreglo finito, los usos de suelo se clasifican en activos y fijos. Los cálculos de las transiciones potenciales se basan en la aptitud intrínseca de la célula para cada uno de los usos de suelo activos y en la relación con los distintos usos de las celdas vecinas. Evalúa aspectos como la accesibilidad a vías de comunicación, pesos, inercia y la perturbación estocástica de las decisiones de los actores.

4. Estado del arte

4.1. Introducción

En el siguiente capítulo se exponen dos investigaciones orientadas hacia la modelación del crecimiento urbano empleando autómatas celulares, en las que se usaron modelos para la simulación de la dinámica compleja de los sistemas urbanos, dando como resultado simulaciones caracterizadas por un alto grado de confiabilidad, esta recopilación tiene la finalidad de contextualizar el trabajo de tesis que aquí se presenta.

En primer lugar, se muestra la realizada por White de 1996 para la simulación del crecimiento urbano en la ciudad de Cincinnati, Estados Unidos. La metodología empleada fue desarrollada por el investigador, la cual destaca por conceptualizar la dinámica urbana bajo un enfoque en sistemas complejos a nivel espacial.

La investigación de White resalta por la capacidad de desarrollar un modelo en el que convergen una serie de reglas simples con resultados con una alta fiabilidad. Otras características que sobresalen del modelo es la representación en un espacio cartesiano de los resultados, así como del potencial uso que se puede generar con dichas herramientas.

En segundo lugar, se expone la investigación realizada por Camacho de 2012, en el cual con la metodología desarrollada en los trabajos de White, se logra la modelación con éxito del crecimiento urbano de una localidad en la Ciudad de México, la investigación de Camacho se ambienta en la conurbación de dos poblados pertenecientes a la Alcaldía Tlalpan.

La importancia de los resultados obtenidos por Camacho implica la posibilidad de implementación de estas técnicas dentro del territorio nacional, además, la zona bajo estudio pertenece a la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual también forma parte el municipio de Tonanitla.

En resumen, en esta sección se muestran un par de trabajos enfocados a la simulación de fenómenos urbanos y la aplicación del modelo de Roger White en contextos reales. Para ambas investigaciones se exponen las características, los procesos de calibración, los resultados de la simulación, la evaluación de los resultados y las conclusiones.

4.2. Simulación los cambios de uso de suelo de Cincinnati, White (1996)

4.2.1. Introducción

Este apartado corresponde a la investigación realizada por el Geógrafo Roger White, en la cual se integró la teorización de las ciudades como un sistema complejo, auto organizado y dinámico, el modelado de sistemas geográficos y la representación formal de la evolución estructural de las ciudades.

Para éste estudio, Roger White elige la ciudad de Cincinnati debido la cantidad y calidad de información disponible en los trabajos de Passonneau y Warman (1966). Dichos autores publicaron datos estandarizados de usos de suelo para 1960 para 20 ciudades de Estados Unidos.

La selección de la zona de estudio se debe también a factores como la escala y resolución de la información, ya que en algunas ciudades el área cubierta en los insumos no cubría la totalidad de la aglomeración urbana y por ende las áreas periféricas no se representaban. Para el caso de ciudades más pequeñas como Cincinnati, el problema se reducía.

El objetivo de la investigación fue probar que el modelo basado en autómatas celulares es capaz de generar una representación razonable de la dinámica urbana, haciendo posible la reproducción de predicciones en los cambios de uso de suelo con un alto grado de resolución espacial.

4.2.2. Características del modelo

En este tipo de modelos, los estados de cada una de las células representan los usos de suelo fijos y activos bajo estudio. El valor de cada celda representa 250 metros y para esta investigación se empleó una cuadrícula de simulación de 80 por 80 celdas y el tipo de vecindad se extiende por un marco de seis celdas de ancho. El modelo se desarrolló con tres usos de suelo activos (vivienda, la industria, y comercio), y tres usos de suelo fijos característicos (ferrocarril, carretera y ríos).

Los usos activos se caracterizan por ser aquellos estados que pueden cambiar, de tal forma que, los estados de las celdas afectan el cálculo de potenciales para celdas dentro de la cuadrícula de simulación situada en las proximidades.

Por otro lado, los fijos (figura 4.1) corresponden a las características consideradas como permanentes, por lo que celdas ocupadas por las características fijas afectan los potenciales de transición de otras células pero no pueden modificarse.

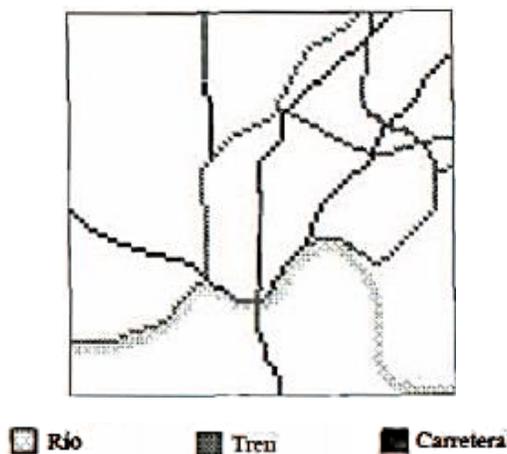


Figura 4.1. Usos de suelo fijos Fuente: White (1996)

Los estados potenciales se calculan con la fórmula del apartado 3.10.2, en la cual se evalúan las características de afinidad entre usos de suelo y la situación geográfica de los mismos para la determinación del estado con mayor potencial. Para este modelo se ejecutaron simulaciones durante 50 iteraciones.

4.2.3. Calibración del modelo

El modelo se calibró con los datos de Cincinnati de 1960, mediante el método de prueba y error se modificaron el conjunto de rangos considerados en trabajos previos, ya que, el empleo de parámetros de simulaciones genéricas reducía el tiempo de la calibración.

El objetivo fue señalar que los valores calibrados de los parámetros de transición, m , son cualitativamente muy similares a los utilizados en las simulaciones genéricas y por ende simplificar las tareas de calibración del modelo se aplique a otras ciudades.

En la tabla 4.1 muestra los valores calibrados para replicar las características generales del mapa de Cincinnati de uso de la tierra en 1960. La tabla se divide en comercio, industria y vivienda, cada bloque se subdivide para cada uso particular de suelo vacante y las características fijas que pueden afectar el potencial de transición.

Usos de suelo

Distancia

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>Comercio</i>																		
<i>Vacante</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Comercio</i>	98	98	98	98	38	19	-20	-21	-21	-20	-20	-21	-21	-21	-21	-20	-20	-20
<i>Industria</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Vivienda</i>	12	8	7	5	5	4	4	3	2	3	2	2	3	2	3	2	3	2
<i>Ferrocarril</i>	-19	-19	-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Carretera</i>	98	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Industria</i>																		
<i>Vacante</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Comercio</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Industria</i>	97	98	97	41	15	5	6	5	5	6	7	3	4	0	0	0	0	0
<i>Vivienda</i>	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	6	6	5
<i>Ferrocarril</i>	60	60	56	49	40	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Carretera</i>	56	50	43	35	24	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Vivienda</i>																		
<i>Vacante</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2
<i>Comercio</i>	-20	0	22	21	18	18	16	15	14	13	11	10	8	7	7	5	5	5
<i>Industria</i>	-31	-27	-21	-8	-1	3	4	5	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6
<i>Vivienda</i>	34	27	23	21	15	14	11	10	9	7	7	6	4	3	4	3	4	2
<i>Ferrocarril</i>	-21	-21	-12	-7	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Carretera</i>	-5	-1	3	3	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	4

Tabla 4.1. Parámetros calibrados del mapa de Cincinnati Fuente: White (1996)

El grado coincidencia o similitud entre el conjunto de parámetros de transición calibrados de las ciudades se basa en una serie de principios básicos de ubicación:

- Efectos de atracción y repulsión de un uso de suelo a otro, debido a factores como la aglomeración economías, complementariedad.
- Efectos de la distancia, representando efectos de atracción y repulsión con el incremento de la distancia.

- Factores específicos del territorio, como efecto de la topografía o la zonificación los cuales son captados en los parámetros de idoneidad.

La tarea principal en la calibración es establecer los valores de los parámetros de transición m de la ecuación de White (apartado 3.10.2) en función de los principios de ubicación. Esos parámetros son los que expresan los efectos de las diversas actividades de uso de suelo.

4.2.4. Simulación de usos de suelo de Cincinnati

En ausencia de un mapa histórico de uso de la tierra de Cincinnati, se optó por recrear la ubicación y la forma de la ciudad a mediados del siglo XIX, esto con el objetivo de configurar las condiciones iniciales para la simulación (Figura 4.2.a).

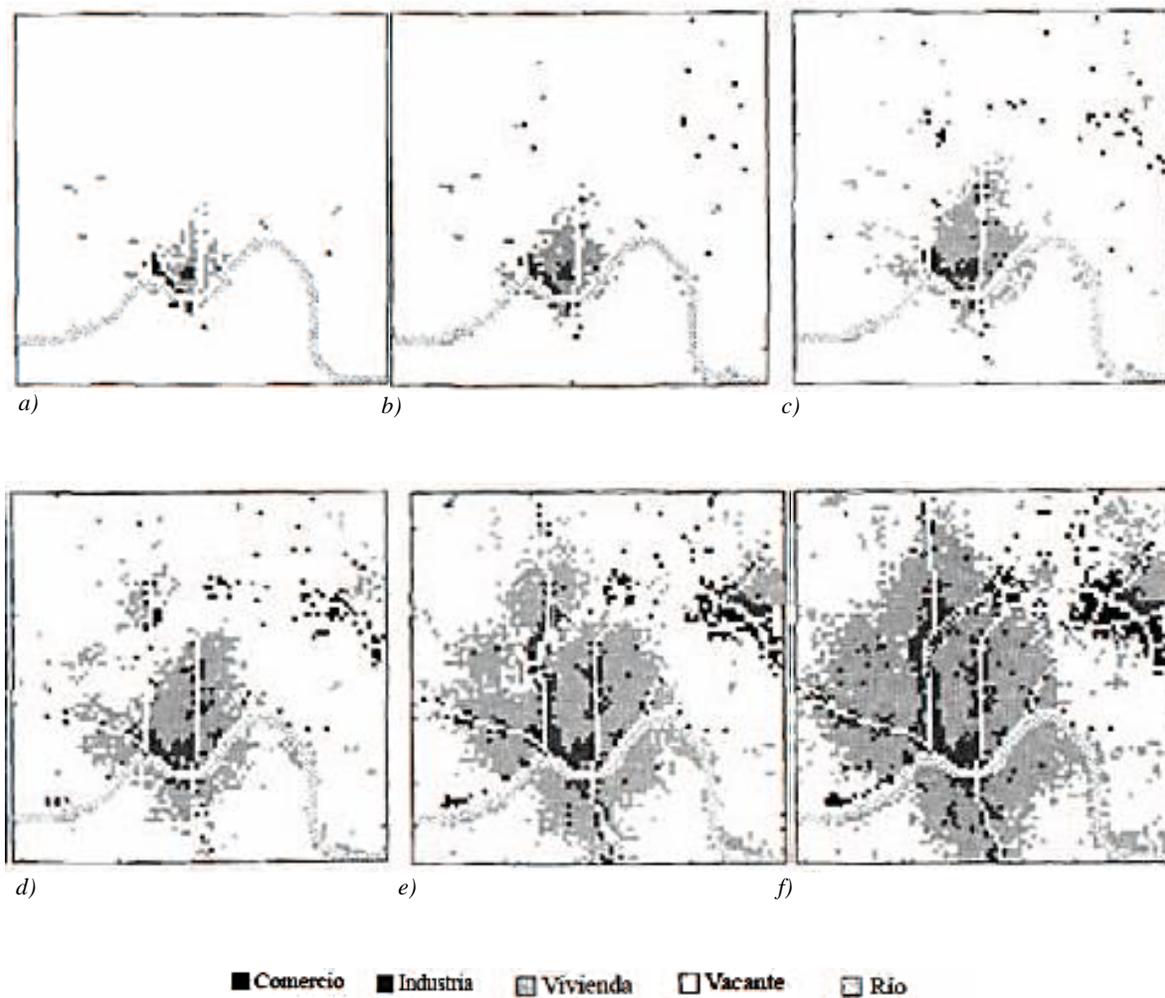


Figura 4.2. Simulación de ciudad de Cincinnati en seis iteraciones a)0; b)10; c)20; d)30; e)40; f)45. Fuente: White (1996)

Se empleó una tasa de crecimiento constante de 1.07 por iteración a cada uno de los tres usos activos del área. El motivo de la elección de esa tasa se debe a que para la iteración 50 el número de celdas ocupadas por cada uno de los tres tipos de uso de la suelo equipara al número presente en el Mapa de Passonneau y Wurman para 1960.

Por lo tanto, el mapa de iteración 0 (corresponde a la ciudad real en 1840) en conjunto con la tasa de crecimiento en el área urbanizada del 32% originaron el mapa hasta el periodo de 1960.

En la figura 4.2. se ilustra el resultado de las simulaciones en el estado inicial de la ciudad y en las iteraciones 10, 20, 30, 40 y 45. Después, la figura 4.3 corresponde a otra serie de simulaciones, esto se realizó con el objetivo de analizar los impactos por modificaciones en el factor estocástico (α) en el sistema.

4.2.5. Evaluación

Para llevar a cabo las evaluaciones White comparó los resultados de las simulaciones con la ciudad real. Se pueden emplear una variedad de técnicas, entre las que destacan:

- Comparación visual de los mapas con evaluación cuantitativa del grado en que coinciden las áreas de uso de suelo
- Comparación cualitativa de medidas abstractas de los dos mapas, como diversas medidas de dimensión fractal.

En la comparación de las simulaciones mostradas en la figura 4.3 con la ciudad real, se obtuvo que la semejanza fue cercana, a pesar de la naturaleza del objeto bajo estudio y la capacidad de los métodos empleados.

Las discrepancias se presentan, por ejemplo, en el ámbito de las viviendas en el área periférica de Cincinnati ya que en el mapa real están alineadas a lo largo de la cuadrícula de calles y carreteras. Este patrón es ausente en las simulaciones debido a que la red de carreteras no está modelada con suficiente detalle.

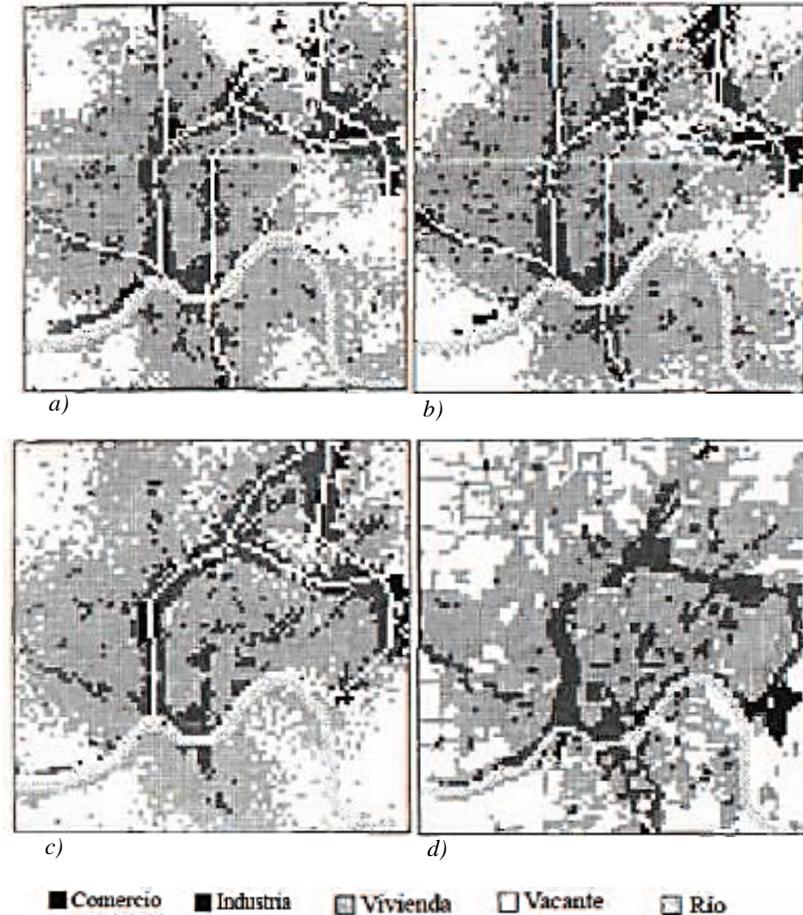


Figura 4.3. Resultado de 3 simulaciones y ciudad real de 1960 (d); iteración 50 (a); simulación con variantes aleatorias (b); simulación con la representación de red de carreteras (c). Fuente: White (1996).

Además, ninguna de las simulaciones captura el área principal de uso de suelo 'industrial' ubicado en la sección sureste, próxima al río en el mapa de Cincinnati. Por lo tanto, la simulación de usos de suelo específicos no fueron generados debido a la aplicación de reglas bastante diferentes a las incluidas en el modelo actual.

De forma que las actividades que son muy diferentes en términos de los factores de ubicación a los que responden no pueden agruparse en la misma categoría de uso de suelo sin limitar el rendimiento del modelo.

A nivel cualitativo, se pudo obtener la medida en el grado de similitud entre las simulaciones y la ciudad real. La técnica consistió en evaluar el grado en que coincidieron los dos mapas de uso del suelo mediante una matriz de coincidencia. Bajo este enfoque se realizó una comparación celda por celda de dos mapas determinando el número de celdas que resultaron ser estados idénticos en ambos mapas.

4.2.6. Análisis de sensibilidad

Si el enfoque de las simulaciones se orienta hacia aplicaciones prácticas, el método empleado debe poseer la capacidad de generar predicciones confiables a pesar del carácter estocástico del objeto de estudio. Para obtener un grado de comprensión de la previsibilidad inherente del modelo configurado para su aplicación a un caso particular, White realizó un análisis de sensibilidad.

Para el análisis de sensibilidad se utilizaron matrices de coincidencia ya que permiten la comparación de los mapas. Mapas que contienen el mismo número de usos de la tierra y número total de celdas ocupadas por cada uso.

Primeramente se comparó la simulación con valores genéricos contra la simulación con variaciones en el factor estocástico (figura 4.3a y 4.3b). La matriz de coincidencia se muestra en la tabla 4.2 junto con los valores asociados para los tres usos activos de la tierra.

Simulación 1					
<i>Simulación 2</i>	Vacante	Comercio	Industria	Vivienda	Total
<i>Vacante</i>	1532	8	78	378	1996
<i>Comercio</i>	16	126	10	86	238
<i>Industria</i>	69	13	509	114	705
<i>Vivienda</i>	379	91	108	2262	2840
<i>Total</i>	1196	238	705	2840	5779
<i>Índice K</i>	.66	.51	.69	.69	.69

Tabla 4.2. Matriz de coincidencia para ambas simulaciones teniendo de referencia el número de células Fuente: White (1996)

El valor de coincidencia (K) para el comercio fue de 0.51, de acuerdo con la interpretación de White considera que el valor se ubica en el extremo superior del rango apropiado. El resto de valores se califican como adecuados, ya que el valor 0.69 representa el límite superior de las cifras aceptables.

Con la tabla se compararon ambos mapas (figura 4.3a y 4.3b) y las limitaciones del enfoque de la matriz de coincidencia se hacen evidentes, debido a que la información posicional del uso de suelo en los dos mapas se reduce a dos opciones, acertar o fallar.

No obstante, al emplear los mapas se obtiene que la ubicación general de las celdas de cada uno de los tres usos es bastante similar. La semejanza incluye en el caso de celdas individuales, debido a que el uso particular del suelo se desplaza una distancia de uno o dos células; por lo tanto los patrones espaciales son bastantes similares en los dos mapas.

Un aspecto a destacar es la temporalidad de ambas simulaciones, ya que se representa más de cien años de crecimiento urbano. White (1996), menciona que las simulaciones con aplicaciones prácticas, un margen útil de los productos es entre 20 o 25 años, temporalidad que es cubierta en 10 iteraciones en el presente modelo.

Por consecuencia, para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se ejecutaron nuevamente otra serie de simulaciones en las que el mapa con iteración 40 (figura 4.2e) se tomó como la configuración inicial.

La ciudad en esa temporalidad aun no materializaba la urbanización del área cubierta por la simulación, se presentaban grandes porciones de terreno vacante por urbanizar; por su parte, se ejecutaron en tres conjuntos de cuatro simulaciones y las simulaciones en cada conjunto dieron como resultado escenarios diferentes a los obtenidos a partir de aplicar números aleatorios:

Para el primer conjunto se emplearon los valores usados para generar mapa de la figura 4.2, con un valor de estocasticidad $\alpha=1.5$.

El segundo conjunto la aleatoriedad fue idéntica al primero, con excepción de que no se aplicaron las conveniencias geográficas entre usos (figura 4.4).

El tercer conjunto difiere del primero únicamente en el nivel de estocasticidad, ya que para este se elevó a $\alpha= 2.0$, produciendo una distribución más dispersa de los usos de suelo.

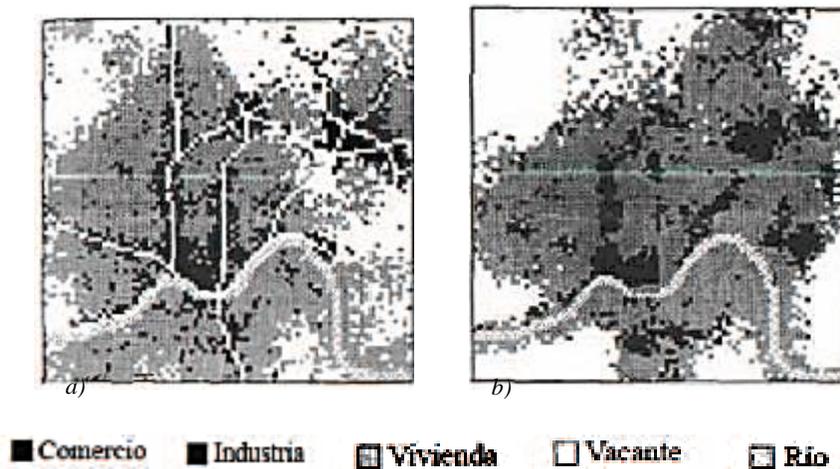


Figura 4.4. Efecto de las conveniencias geográficas. Simulación sin vías de comunicación terrestre (a) y Simulación sin conveniencias (b). Fuente: White (1996).

Como hay cuatro corridas en cada conjunto, se pueden hacer seis comparaciones de mapas para cada conjunto. Para cada par de mapas se calculó una matriz de coincidencia, estas en el texto no se presentan individualmente, pero en la tabla 4.3 se muestran los valores promediados sobre las seis posibles comparaciones de las cuatro simulaciones en cada conjunto.

	Comercio	Industria	Vivienda
$\alpha= 1.5$			
Iteración 5	0.11	0.33	0.49
Iteración 10	0.20	0.52	0.64
$\alpha= 1.5$ sin conveniencias			
Iteración 5	0.12	0.24	0.44
Iteración 10	0.22	0.38	0.59
$\alpha= 2$			
Iteración 5	0.08	0.19	0.29
Iteración 10	0.16	0.36	0.48
Total de celdas añadidas			
Iteración 5	46	168	714
Iteración 10	137	391	1608

Tabla 4.3. Similitud en resultados de la simulación Fuente: White (1996)

De lo anterior se obtuvo que para el caso del comercio y la industria los resultados fueron precisos debido al factor de inercia y otras limitaciones que evitaron la conversión a otros usos de suelo. Caso contrario con lo que ocurrió con la vivienda, puesto que se presentaron errores ligeros dentro de un rango de 0.02 e inferior.

Otro punto es, cuando el grado de aleatoriedad se mantuvo constante en $\alpha=1.5$ y se aplicaron las conveniencias geográficas, se llega a un grado mayor de previsibilidad de la forma de la ciudad. Al aumentar el valor a $\alpha=2.0$ la fiabilidad disminuyó un 25%.

Al considerar otros aspectos, los resultados sobresalieron por la precisión alcanzada. Muestra de eso es la baja previsibilidad a corto plazo, 8 a 12 por ciento (peor resultado) de células de comercio coincidieron con su semejante simulado en la iteración 5.

A medida que aumentan las iteraciones la previsibilidad incrementa, en la iteración 10 se registraron valores de 20 por ciento de afinidad para el caso de comercio, 52 por ciento para la industria y 64 por ciento para la vivienda.

Por lo tanto se obtuvo un incremento del grado de previsibilidad a medida que aumenta la duración del periodo de pronóstico, por ende este parámetro no es satisfactorio como una medida de previsibilidad.

Entre los factores por los cuales la matriz de transición no es un instrumento adecuado destaca la no consideración del patrón de localización de los usos del suelo, mismo que da sustento al modelo de White.

Para el modelo de White cuándo una celda de un tipo específico de uso de suelo se va a agregar, las conveniencias junto con la configuración de usos restringe la posible ubicación a pequeñas zonas, el factor perturbación aleatoria desvía la elección de un sitio a otro dentro de la misma zona.

Para las comparaciones de las dos simulaciones en las interacciones anteriores, el factor aleatorio al dirigir la nueva celda a diferentes lugares origina la baja en el porcentaje de coincidencia a pesar de que la celda se encuentre dentro de la misma área probable.

Por lo tanto, a medida que las iteraciones continúan y el área probable comienza a recalcularse, la proporción de coincidencia de los lugares de las células aumenta. Cabe mencionar que el grado de previsibilidad llegará a un máximo y a partir de un determinado número de iteraciones comenzará a disminuir la confiabilidad.

De ahí que el método adecuado para indicar el nivel de similitud de los resultados de las simulaciones sea la comparación visual. En la figura 4.5 se presenta una comparación de la configuración espacial de la ciudad generada en las simulaciones. Las formas urbanas, a nivel cualitativo, son similares a pesar de que en ambas simulaciones las células no coincidan.

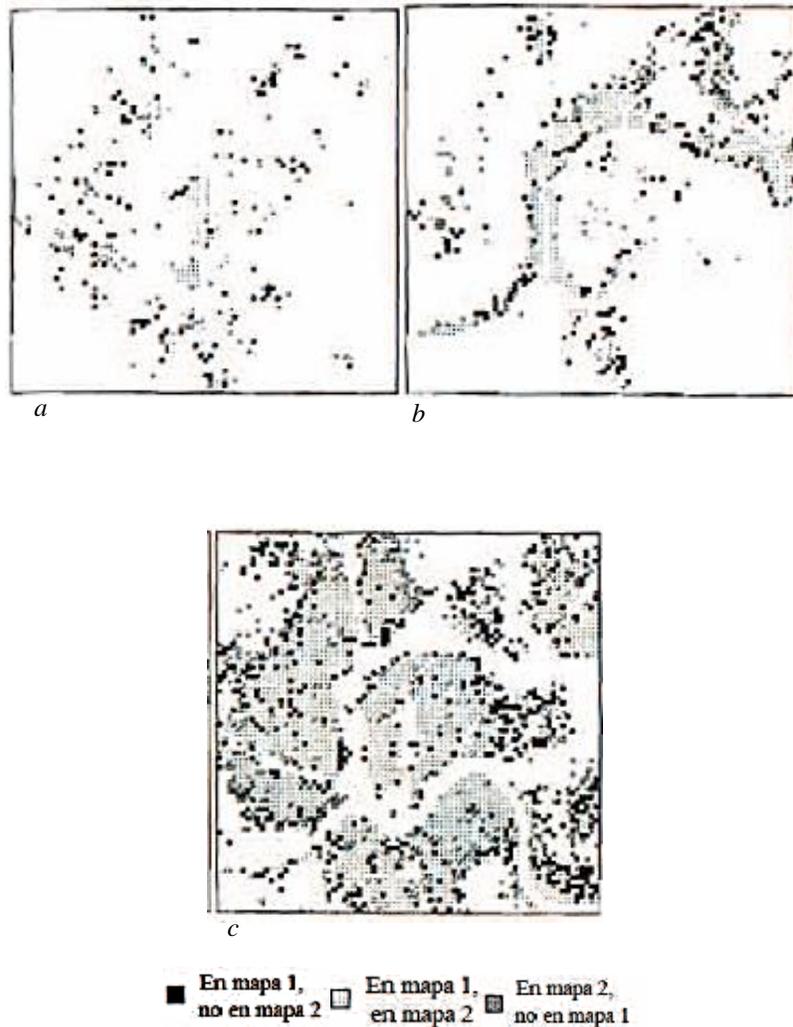


Figura 4.5. Comparación de celdas de comercio (a), industria (b) y vivienda (c) de dos simulaciones con variaciones en el valor de aleatoriedad. Fuente: White (1996.)

Los mapas de la figura 4.5 se obtuvieron de la diferencias entre la representación en las condiciones iniciales y otro mapa que conjuntaba el área obtenida en las distintas simulaciones.

4.2.7. Conclusiones

A partir de la investigación de White se deduce que los modelos basados en autómatas celulares aplicados al análisis del crecimiento urbano pueden dar una representación acertada de la dinámica de las ciudades además de proveer un alto grado de detalle espacial de acuerdo con los resultados de las diferentes simulaciones de la ciudad de Cincinnati y de las series de análisis de sensibilidad.

Para este estudio de caso, a pesar de la aleatoriedad de las decisiones inmiscuidas en el desarrollo urbano, con los elementos considerados permanentes (red vial, ríos, topografía) y los dinámicos (usos de suelo) se obtuvieron resultados apropiados de la evolución de los patrones de uso de suelo de Cincinnati.

El análisis de sensibilidad aplicado en este modelo lo realizó con diez iteraciones que representan un periodo de 25 años, esto es un pronóstico a largo plazo. De ahí que los resultados puedan ser empleados como un instrumento auxiliar para explorar los posibles impactos del crecimiento urbano en el territorio y las opciones plausibles para la planificación.

En este trabajo se conjuntan los medios necesarios para el procesamiento de datos espaciales y la generación de los insumos para el modelo. La visualización cartográfica brinda la posibilidad de producir las entradas y representar las salidas, además de la vinculación con el modelo basado en AC posibilita la manipulación y la generación de simulaciones de una ciudad real.

4.3. Cambios de usos de suelo y crecimiento urbano de Santo Tomás Ajusco – San Miguel Ajusco, Camacho (2012).

4.3.1. Introducción

En esta investigación se estudiaron los pueblos de Santo Tomás y San Miguel de Ajusco, ambos ubicados en la Alcaldía de Tlalpan en la Ciudad de México. La elección de dicha área se debe a la tendencia acelerada del crecimiento del área urbana sobre suelo de preservación ecológica (agrícola, forestal, pastizal y matorral).

Para el estudio se utilizó un modelo basado en AC para explicar los cambios de usos del suelo de los pueblos del Ajusco. Se generaron simulaciones con las cuales se pudo estimar para diferentes periodos futuros los cambios de uso del suelo.

Los principales elementos que se usaron para modelar y simular los cambios de uso del suelo en el área de estudio fueron los componentes de la localidad (usos de suelo), las vialidades y las relaciones que existen entre estos.

4.3.2. Características del modelo

El espacio celular corresponde al territorio comprendido por el pueblo de Ajusco (San Miguel y Santo Tomás) y sus alrededores. Debido a las condiciones de frontera de los autómatas celulares, se definió un área rectangular con dimensiones más grandes que la zona de ambos pueblos.

El espacio celular (figura 4.6) está definido por las coordenadas: $19^{\circ}14'28.22''N$ - $99^{\circ}14'01.07''W$ y $19^{\circ}11'53.12''N$ - $99^{\circ}10'07.34''W$, conformando de esta manera un polígono rectangular con unas medidas de 8000 m de ancho por 6000 m de alto, además se utilizó una célula de una dimensión de 8 por 8 metros; con estas medidas se representó a detalle los distintos usos de suelo y vías de comunicación en el territorio.

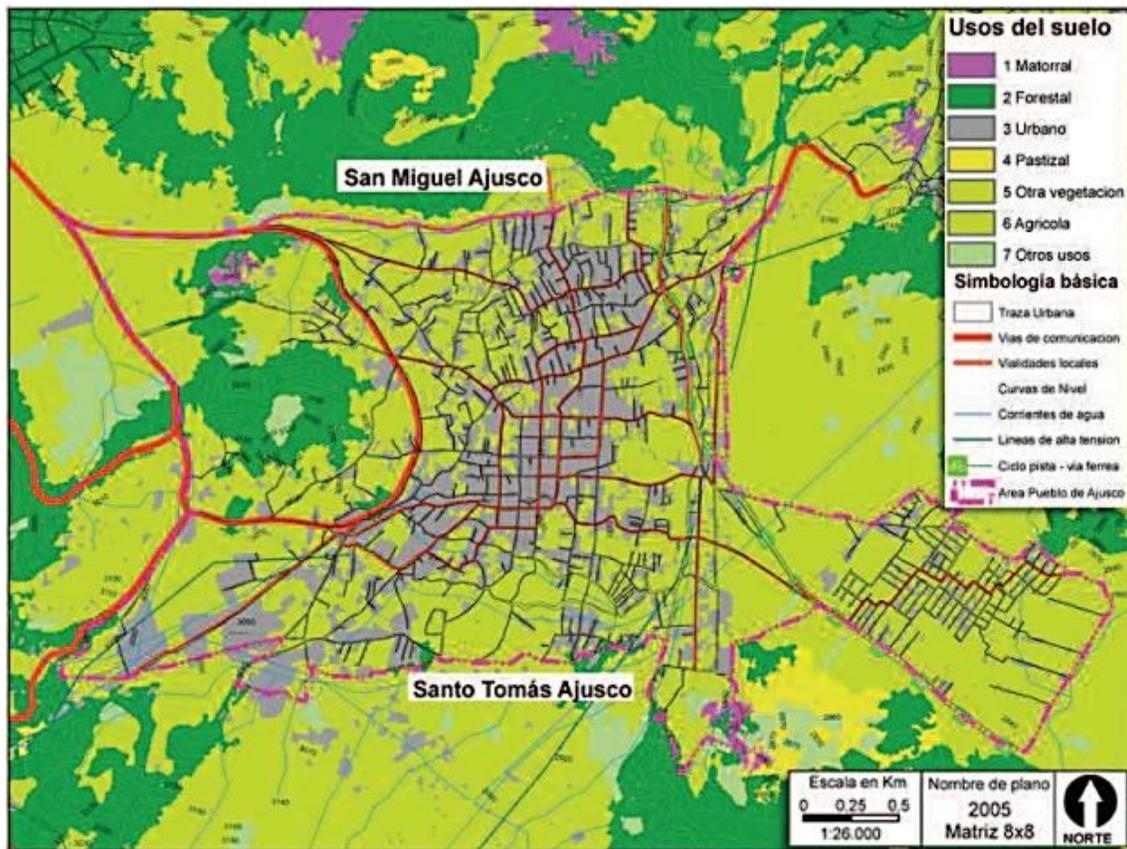


Figura 4.6. Área de estudio Fuente: Camacho (2012)

El conjunto de estados dinámicos definidos fueron el uso urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, otra vegetación y otros usos. Por el contrario, en los fijos únicamente se consideró las vías de comunicación terrestre.

La función de transición usada fue la propuesta por Roger White, para el cálculo del potencial del cambio de cada uno de los usos de suelo bajo análisis. La función sirve para calcular series de potenciales de transición para cada celda activa, posteriormente se cambia el estado de cada celda al estado para el cual tiene el más elevado potencial.

El tipo de vecindad y de radio se definieron según el modelo de White, es decir se usó la vecindad de tipo Moore extendida y con un radio de 6.

4.3.3. Calibración del modelo

Para llevar a cabo la calibración sobre las características y la dinámica del área de estudio se definieron en primera instancia los aspectos de accesibilidad, pesos, inercia y perturbación estocástica.

El efecto de la accesibilidad a la red de transporte en el modelo se programó entre un rango de entre 0 y 1. Aquellos usos con valores próximos al número 1 indican que una célula tiene mayor probabilidad de cambiar o permanecer con el uso si se tiene cercanía con las vías de comunicación terrestre.

Para el factor de peso los valores van de -1 a 1, mientras más cercano sea el valor a 1 implica que el uso de suelo tiene una mayor influencia o de atracción en sus vecinos. Este parámetro tiene como recurso valores negativos, por lo que si los valores son próximos a -1 la influencia es menor o de repulsión.

Los rango valores que puede tomar la inercia van de 0 a 1 y representa la probabilidad de que una celda permanezca en su estado actual. Finalmente, la perturbación estocástica es la magnitud de la variable aleatoria, los valores que predefinidos oscilan entre 0 a 1.

En la tabla 4.4 se muestra los valores que Camacho definió para la primera etapa de calibración del modelo. La tabla está dividida entre los siete distintos usos de suelo y los tres aspectos considerados en el modelo de White, así mismo, se expone el valor de la perturbación estocástica de todo el sistema.

	Urbano	Otra vegetación	Agrícola	Otros usos	Pastizal	Forestal	Matorral
<i>Accesibilidad</i>	0.90	0.80	0.50	0.50	0.40	0.13	0.10
<i>Peso</i>	0.95	0.52	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
<i>Inercia</i>	0.95	0.90	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
<i>Estocasticidad</i>	0.50						

Tabla 4.4. Valores de accesibilidad, peso e inercia por uso de suelo Fuente: Camacho (2012).

Posteriormente se definieron los potenciales de transición, los cuales son los que reflejan la aptitud de convivencia de cada uno de los usos del suelo activos en relación con los diferentes usos del suelo ubicados en la vecindad de la célula. Algunos usos del suelo son incompatibles como vecinos, otros se refuerzan mutuamente.

En la tabla 4.5 se resume la matriz de los potenciales de transición los cuales Camacho definió a partir de una serie de pruebas de calibración del modelo.

	Urbano	Agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Otra vegetación	Otros usos
<i>Urbano</i>	1.00	0.45	0.95	0.50	0.51	0.35	0.10
<i>Agrícola</i>	0.00	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
<i>Forestal</i>	0.10	0.10	0.45	0.10	0.10	0.10	0.10
<i>Pastizal</i>	0.10	0.10	0.10	1.00	0.10	0.10	0.10
<i>Matorral</i>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.49	0.10	0.10
<i>Otra vegetación</i>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.00	0.10
<i>Otros usos</i>	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	1.00

Tabla 4.5. Matriz de transición Fuente: Camacho (2012)

4.3.4. Simulación de usos de suelo de los pueblos de Ajusco (2010, 2015, 2020)

El modelo se simuló en 5 ciclos, cada ciclo realizó 551,133 cálculos (número correspondiente total de celdas activas) de potencial de cambio de uso de suelo. Para realización de las mediciones de las áreas de los usos de suelo en los distintos ciclos y comparación con los datos reales, Camacho dividió el área de estudio en dos partes, la zona central y zona de La Venta (figura 4.7).

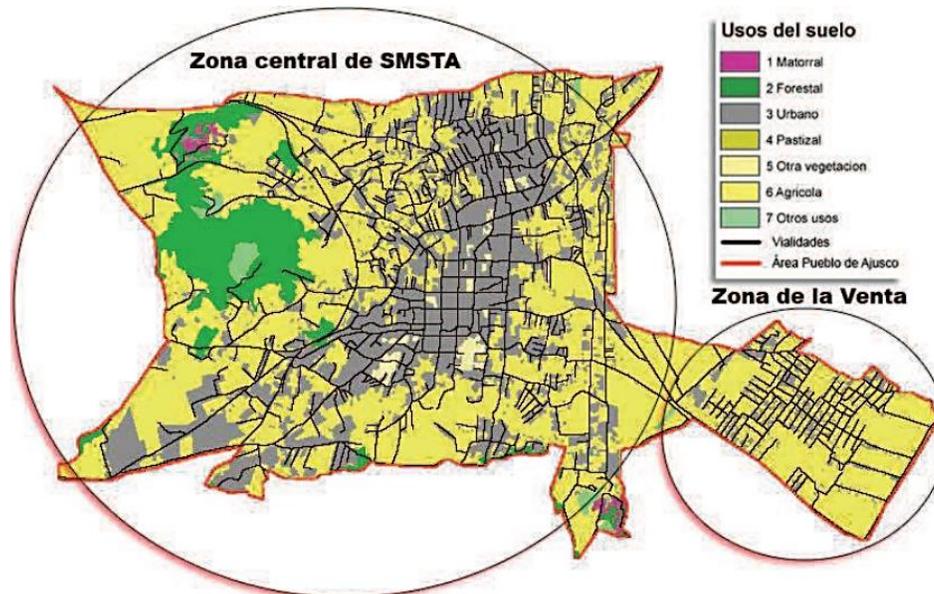
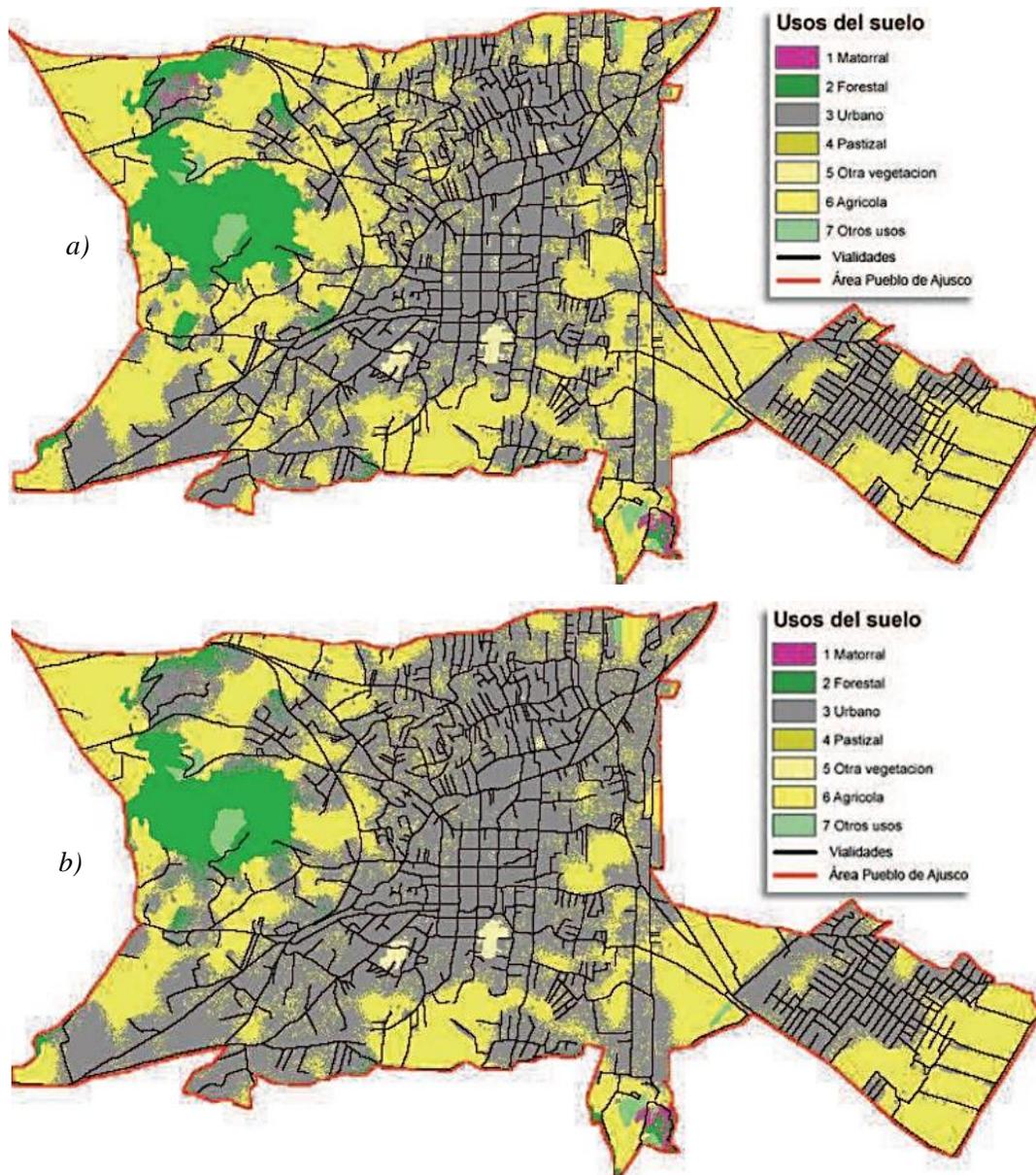


Figura 4.7. Usos de suelo reales 2005, ubicación de Zona Central y La Venta. Fuente: Camacho (2012)

Para estimar los cambios de uso de suelo de San Miguel y Santo Tomás Ajusco de la zona central para el año 2010 (figura 4.8a) se utilizó la simulación del ciclo 1 y para la zona de La Venta, cuya dinámica presentaba un ritmo de crecimiento mayor, la simulación del ciclo 3.

Con respecto a la simulación del año 2015 (figura 4.8b) se usaron los datos generados por el ciclo 2 para la parte central y los del ciclo 4 para la zona de la Venta. Después, para el año 2020 (figura 3c) se tomaron los datos generados por el ciclo 3 para la parte central y los del ciclo 5 para la zona de la Venta.



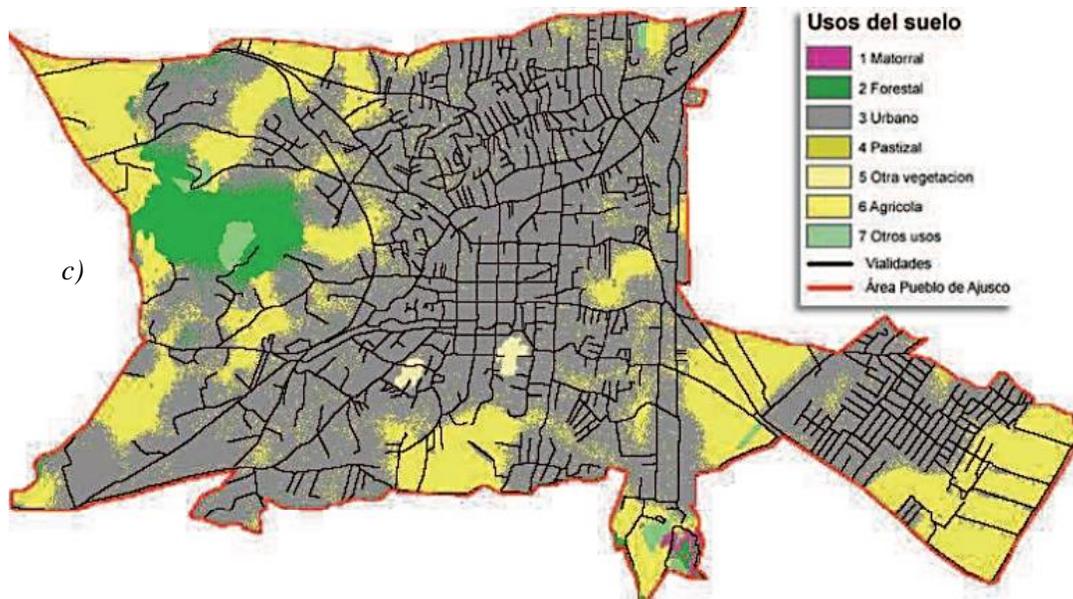


Figura 4.8. Simulación de usos de suelo de San Miguel y Santo Tomás 2010 (a), 2015 (b), 2020 (c). Fuente: Camacho (2012)

El recurso de usar datos de diferentes ciclos se debe principalmente a la configuración del modelo, ya que en cada iteración se calculan todos los potenciales de cada celda, con esto las células evolucionan de forma sincrónica para las cinco temporalidades. Por lo tanto, todas las celdas se actualizan al mismo tiempo.

En último lugar, en la figura 4.9. se representó la sobreposición de los usos simulados de los años 2010, 2015 y 2020, sobre la configuración inicial correspondiente al año 2005.

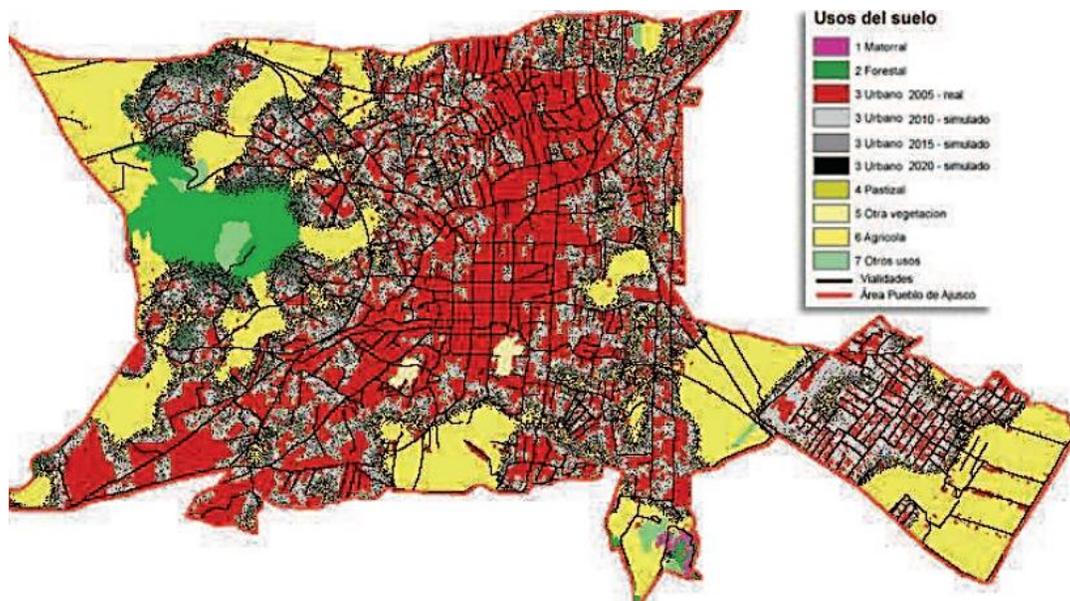


Figura 4.9. Trazo urbano 2005 y simulación de cambios de uso de suelo 2010, 2015 y 2020. Fuente: Camacho (2012).

4.3.5. Evaluación

Para la evaluación de los resultados obtenidos de la simulación contra los datos reales Camacho emplea diferentes técnicas como:

- Comparación cualitativa (visual) de los mapas
- Evaluación tendencial (cuantitativa) del grado en que las zonas de uso de los suelo en los dos mapas coinciden
- Comprobación del grado de similitud de las zonas de usos de suelo de ambos mapas, para esta actividad se usó el método RMSE.

Para la comparación visual, en la figura 4.10 se muestran los usos de suelo reales, la información de esta figura se obtuvieron de una imagen aérea del año 2010, además, se muestran los usos de suelo simulados a partir de los datos reales del año 2005.

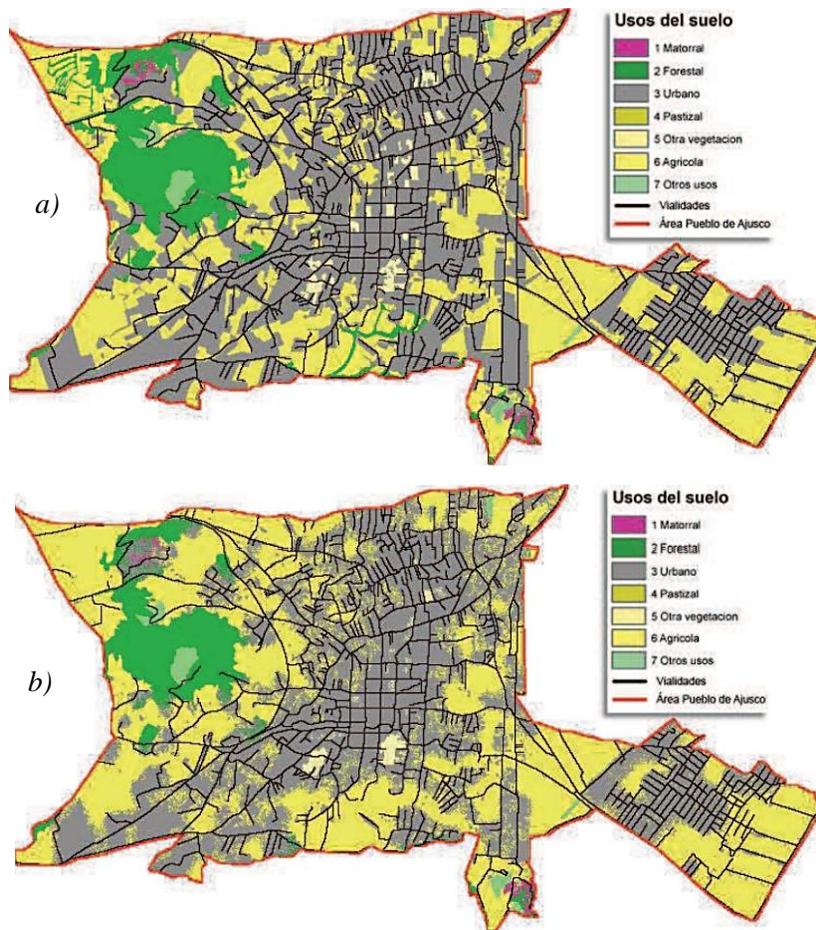


Figura 4.10. Comparación visual (cualitativa) de datos reales (a) y simulados (b) 2010. Fuente: Camacho (2012)

Así mismo, en la figura 4.11 se realizó el ejercicio de sobreponer las imágenes correspondientes al año 2010 con datos reales y simulados. El gris con una tonalidad oscura denota la zona urbana real y en gris claro la zona urbana simulada.

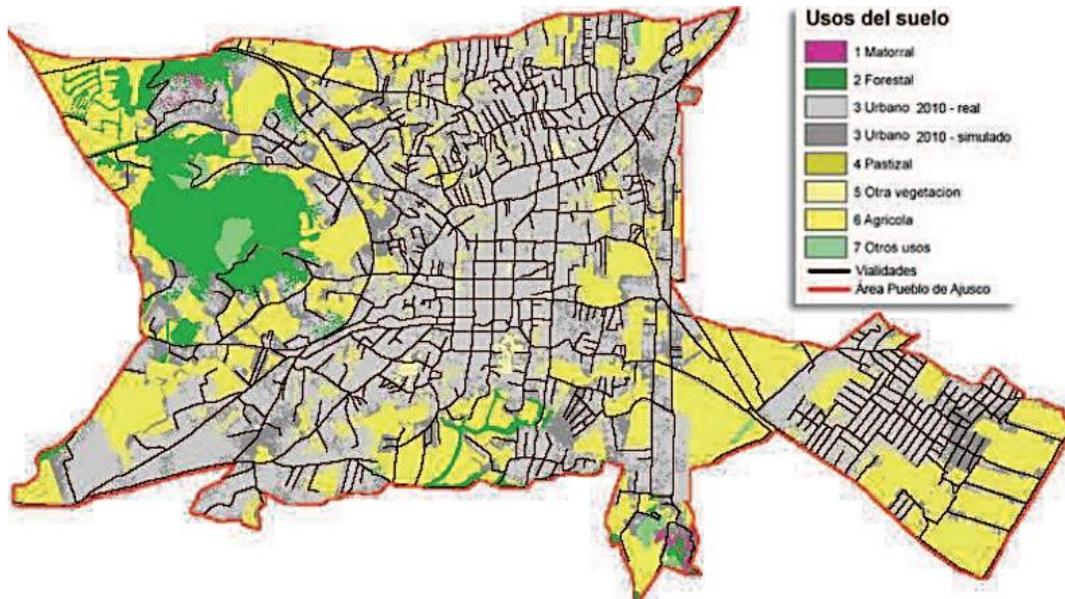


Figura 4.11. Sobreposición de área urbana real y simulada, 2010. Fuente: Camacho (2012)

En efecto, existen discrepancias a simple vista, sin embargo hay un alto grado de similitud a nivel espacial, por ejemplo, los cambios de suelo de agrícola a urbano son cercanos a la realidad.

Con respecto a la evaluación cuantitativa, En la tabla 4.6 se muestran los datos tendenciales de los cambios de uso de suelo de los años de 2005 y 2010 con datos reales. Además, en la figura 4.12 se muestra el gráfico de las tendencias de los cambio de uso de suelo para los años 2010, 2015 y 2020 simulados.

Usos	Urbano		Agrícola		Forestal		Pastizal		Matorral		Agroforestal	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
2005	45.1	45.1	45.8	45.8	7.7	7.7	0.0	0.0	0.5	0.5	0.9	0.9
2010	51.0	50.4	39.5	41.4	8.0	6.3	0.0	0.0	0.5	0.3	0.9	0.9
2015	-	60.8	-	32.4	-	5.2	-	0.0	-	0.2	-	0.9
2020	-	69.4	-	25.0	-	4.2	-	0.0	-	0.2	-	0.9

Tabla 4.6. Tendencias de cambios de uso de suelo en porcentaje (2005-2020). Fuente: Camacho (2012)

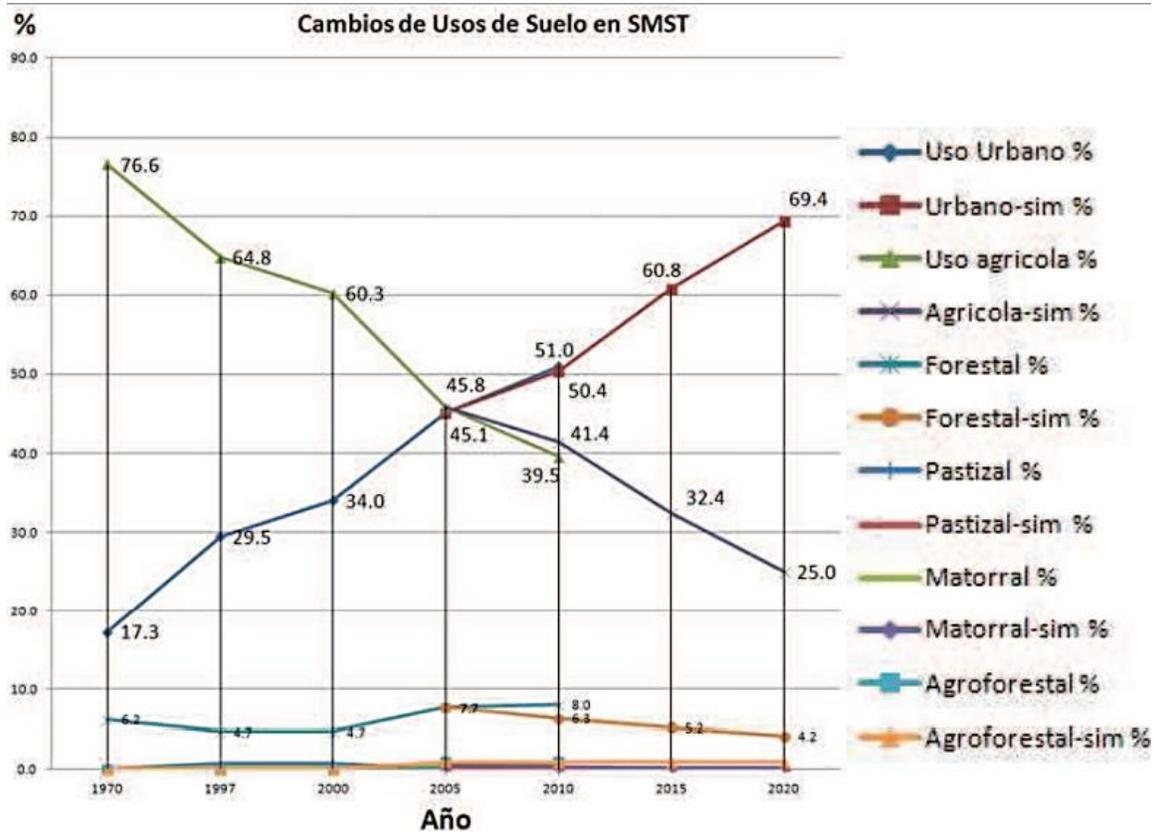


Figura 4.12. Evolución de cambios de uso de suelo real y simulado (2005-2020). Fuente: Camacho (2012).

De ambos recursos se infiere que las tendencias entre los datos reales y simulados denotan un alto grado de similitud. Por ejemplo, para el año 2010 las diferencias son inferiores a 1.9 por ciento, además, en el rubro Pastizal y Agroforestal los valores son exactos.

Para terminar, el tercer enfoque usado para validar el modelo y los resultados fue el de la comparación de los mapas reales y los obtenidos en la simulación por medio del método RMSE (Root Mean Squared Error).

Los resultados del método RMSE (figura 4.13) con las imágenes del año de 2010 real y la imagen del año de 2010 simulada fueron de un error de 9.7 %, es decir, se tiene un 90.3 % de similitud entre las imágenes.



Figura 4.13. Comparación realizada con método RMSE. Fuente: Camacho (2012)

4.3.6. Conclusiones

De acuerdo con Camacho, en esta investigación se comprueba que la simulación generada con el modelo basado en AC tiene con alto grado de certeza de los cambios de uso de suelo. Así mismo, el modelo basado en AC proporciona resultados a nivel espacial, con lo que es posible ubicar las zonas de crecimiento.

Los cambios de uso de suelo pueden ser considerados bajo el paradigma de sistemas complejos, ya que en él influyen una gran cantidad de agentes que intervienen en su dinámica tanto espacial como temporal.

Se pudo estudiar, analizar e incidir en el comportamiento de los cambios de uso de suelo, considerándolos como un sistema urbano complejo. Para este estudio de la dinámica se tomaron a consideración aspectos como:

- Las conveniencias entre los usos de suelo
- El efecto que tiene sobre un uso de suelo específico con los usos aledaños
- El factor de la accesibilidad local

La simulación de los cambios de uso de suelo para diferentes periodos pueden ser usados en actividades relacionadas planeación, como por ejemplo, el cálculo de los servicios y equipamientos necesarios, dotación de nuevas vialidades, sistemas de transporte público, estrategias para el tránsito vehicular entre otros.

5. Caso de estudio

5.1. Introducción

El presente capítulo tiene como principal objetivo identificar las principales variables que han determinado el comportamiento para la conversión de los usos de suelo y la repercusión en la morfología urbana en diferentes temporalidades en el área de estudio correspondiente al municipio de Tonanitla en el Estado de México.

En primera instancia se exponen las características históricas, sociales y territoriales del área, después se lleva a cabo el análisis espacial en el cual se examina la evolución y la tendencia de los cambios de usos de suelo en el Tonanitla. Finalmente, se muestran las características del modelo basado en AC, el proceso de simulación y los resultados de los cambios para diferentes periodos de tiempo.

El área bajo estudio se examina con base a los patrones propuestos por Wilson (citado en Bhatta, 2010:11) de la distribución espacial de los usos de suelo para generar la caracterización del territorio en temporalidades definidas, con esto se pudo enriquecer el estudio al conocer la evolución, los cambios, así como los impactos territoriales del crecimiento urbano.

La visión sistémica contextualizada en las temáticas urbanas nos aporta una aproximación metodológica para el análisis territorial con una visión integral tanto de la estructura como de la dinámica por lo que se buscó integrar con la información acerca de los factores que dirigen el crecimiento urbano.

Una vez superada esta etapa, se procedió con la elaboración del estudio con una visión prospectiva del territorio, de ahí que con los modelos de simulación se incluye la posibilidad de generar datos acerca de las estructuras espaciales a partir de la red de las relaciones humanas y el papel del espacio en la sociedad.

Así mismo, la visualización de crecimiento urbano en un territorio específico ofrece los medios para diseñar alternativas orientadas al mejoramiento de las condiciones y la mitigación de tendencias o situaciones valoradas como problemáticas.

Con la elaboración de investigaciones desde la perspectiva espacial se dispone de aspectos como el patrón de persistencia, la dirección y el ritmo de crecimiento de aquellos factores ajenos al cumplimiento de objetivos estratégicos (SEDESOL, 2010).

5.1.1. Antecedentes

Toponimia

El área bajo estudio corresponde al municipio de Tonanitla (figura 5.2), de acuerdo con la información del Bando municipal 2018, la palabra es proveniente del idioma náhuatl y cuyo significado es *lugar donde se venera a nuestra Madre*.

El glifo municipal (figura 5.1), se identifica en el código Mendoza, está conformado por diversos elementos como: cabeza de mujer anciana sobre un cerro, el cual representa el sitio donde se venera a la diosa Tonan.

Así mismo, la base del cerro hace referencia tanto al pueblo Otomí (originarios del Valle de México) como al pueblo Chichimeca (segunda comunidad en asentarse y fusionar con los pobladores del lugar).



Figura 5.11. Glifo municipal. Fuente: Bando municipal 2010

5.1.2. Historia municipal

El Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, 2003) indica que la historia del poblamiento del territorio que actualmente compone al municipio inició siglos antes del periodo de conquista. El área formó parte de las rutas de migraciones de diversos pueblos como los Otomíes, Chichimecas y Mexicas.

Con el sistema de gobierno de la Nueva España se procedió a la subdivisión y al renombramiento de los territorios ribereños. De esta acción se desprendieron áreas como San Andrés Xaltenco (Jaltenco), Zumpango, Nextlalpan, entre otros.

De acuerdo con la Gaceta del Gobierno (2003), de la municipalidad de Nextlalpan se desprendió el pueblo Tonanitla para conformar un municipio nuevo el cual fue nombrado Plutarco González. Esto se hace oficial ante el Congreso del Estado de México mediante el decreto 41 con fecha del 15 de octubre de 1891.

No obstante, se invalidó esta acción en el 1899 debido a que el pueblo no poseía los elementos necesarios para la conformación de una municipalidad, por lo que se realizaron modificaciones a la configuración territorial de los distritos, municipalidades y municipios, resultando que el pueblo de Tonanitla se anexara a la municipalidad de Jaltenco a pesar de la discontinuidad física entre ambos territorios.

Finalmente, por medio del decreto número 152 expedido en el año 2003 se informa la creación de un nuevo municipio, en el documento definen las características del polígono del territorio por lo que toda la población asentada en dicha extensión quedó bajo disposición de la nueva administración.

Se segregó de Jaltenco un área de 8 517 km² para la conformación del municipio número 125 bajo el nombre de Tonanitla del cual se reconoce como cabecera municipal al pueblo de Santa María Tonanitla.

Entre los factores que se evaluaron para la conformación del municipio destaca:

- Historial municipalista
- Pasado histórico y cultural común
- La interrupción del municipio de Nextlalpan para la colindancia entre la cabecera de Jaltenco y la de Tonanitla
- Capacidad financiera con recursos económicos suficientes para cubrir las erogaciones de la administración pública municipal
- Posesión de inmuebles e instalaciones adecuadas para el funcionamiento de los servicios públicos municipales.

5.1.3. Localización

El área de estudio se encuentra dentro del territorio municipal de Tonanitla, el cual se incluye dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México, ubicado en la sección norte del Estado de México.

Tonanitla cuenta con una superficie de 8 517 kilómetros cuadrados, lo cual representa aproximadamente el 0.04 por ciento del total de la superficie mexiquense. Colinda al norte con Nextlalpan, al este con Tecámac, al sur con Ecatepec y Tecámac, por último, al oeste con Nextlalpan, Tultitlan y Jaltenco.

Para llevar a cabo el análisis de los cambios de uso de suelo, se delimitó un polígono cuadrado de una extensión de 2.5 kilómetros. En dicha área, se engloba la cabecera municipal y tres localidades ubicadas en la periferia (figura 5.2).

La zona de estudio corresponde a la porción norte del municipio, la cual se caracterizaba por ser una zona predominantemente rural y en la se ha observado una constante dinámica de transición de usos de suelo destinados a actividades agrícolas y pecuarias a espacios urbanos.

Así mismo, en el polígono se incluye pequeñas porciones territoriales de los municipios de Nextlalpan y Tecámac, lo cual demuestra que el crecimiento urbano no se restringe a los límites políticos administrativos.

Las coordenadas geográficas extremas del polígono bajo análisis son las siguientes:

<i>Coordenadas extremas</i>	Latitud norte	Longitud oeste
<i>Máxima</i>	19.7008	-99.0669
<i>Mínima</i>	19.6783	-99.0431

Tabla 5.1. Coordenadas extremas del área de estudio: Fuente: Elaboración propia.

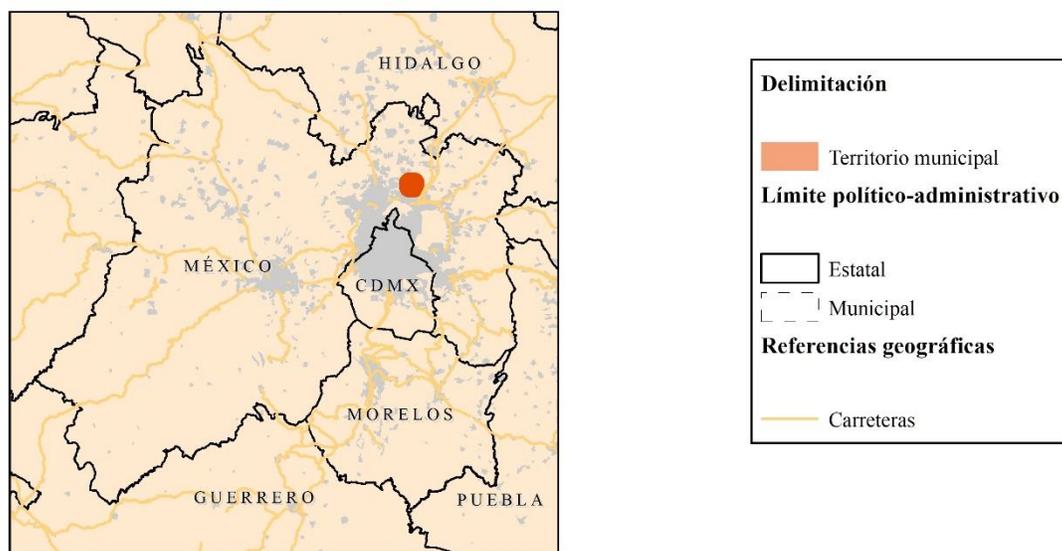
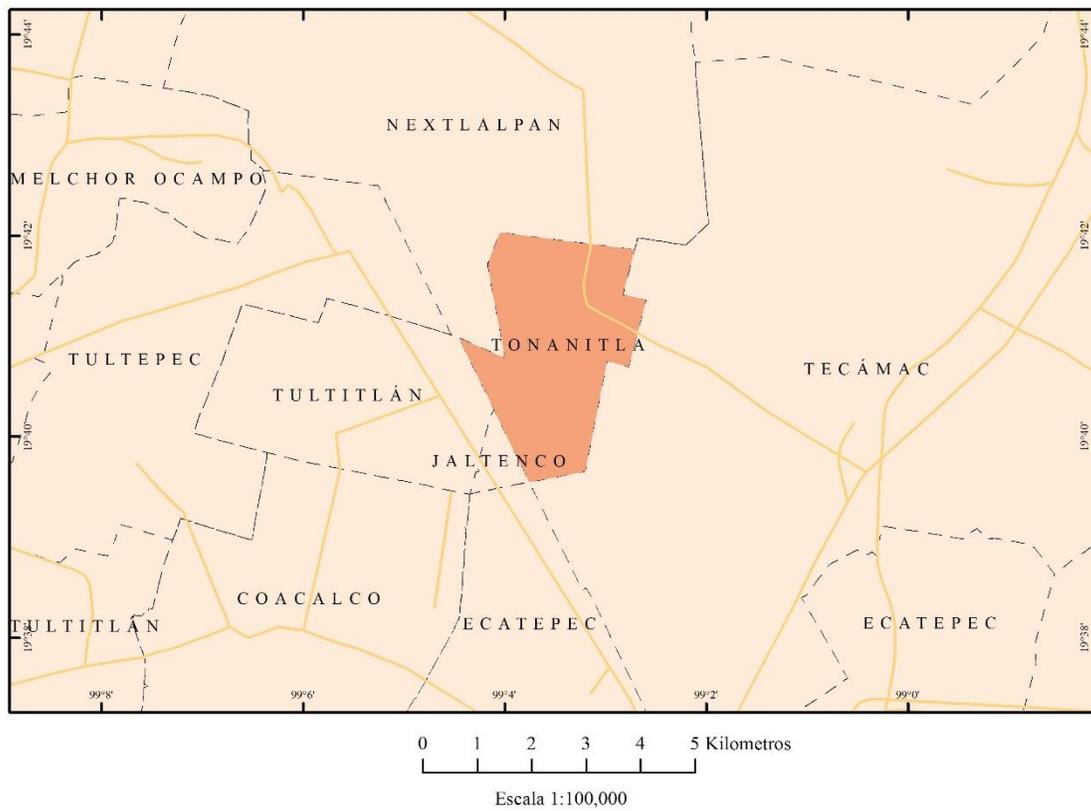


Figura 5.2. Localización. Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geostadístico Urbano, INEGI (2010, 2018)

5.1.4. Medio físico

Orografía

De acuerdo con el diagnóstico ambiental municipal correspondiente al año 2010, Tonanitla se ubica en el sistema orográfico de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, el cual se encuentra dentro de la provincia del Eje Neovolcánico (figura 5.3).

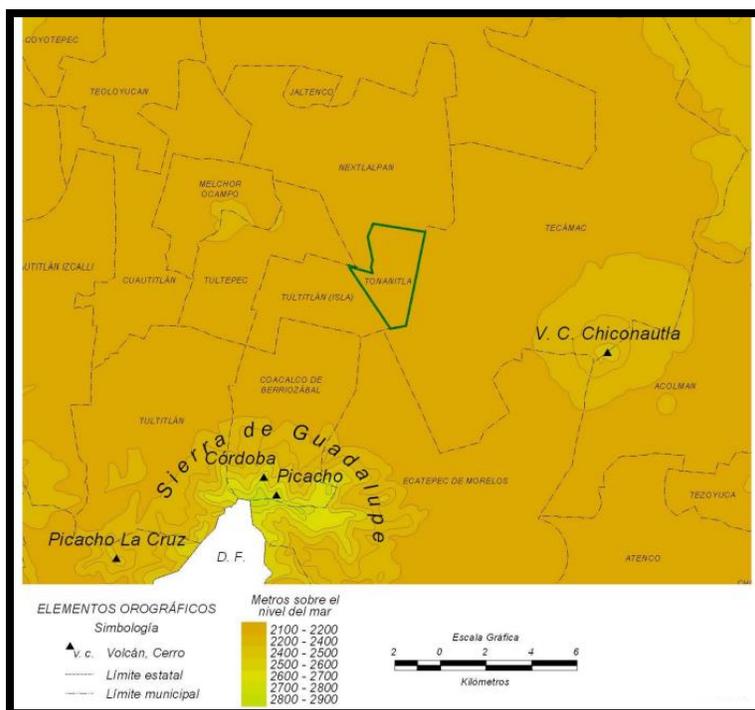


Figura 5.3. Mapa orográfico del Norte del Estado de México. Fuente. Secretaría de Medio Ambiente (2010)

El área municipal se caracteriza por la ausencia de elevaciones, las pendientes registradas son inferiores al 5 por ciento, esto se debe a que el municipio se encuentra emplazado sobre una llanura, la cual formó parte del vaso lacustre.

En el cuadro 5.2 se enlistan las formaciones montañosas ubicadas en un radio de 10 kilómetros a la redonda del Tonanitla, además, en la figura 5.3 se representan dichas elevaciones.

Topografía	Altitud (msnm)	Municipio
Volcán cerro Chinautla	2500	Acolman
Picacho, Sierra de Guadalupe	2520	Coacalco
Córdoba, Sierra de Guadalupe	2794	Coacalco
Picacho la Cruz, Sierra de Guadalupe	2500	Tlalnepantla

Tabla 5.2 Principales elementos orográficos del Norte del Estado de México. Fuente; Secretaría de Medio Ambiente (2010)

Geología

Según datos de la Secretaría del Medio Ambiente (2010) la zona norte del Valle de México (figura 5.4) se caracteriza por la predominancia de rocas sedimentarias del tipo clásticas y volcanoclásticas pertenecientes a la era del Cenozoico.

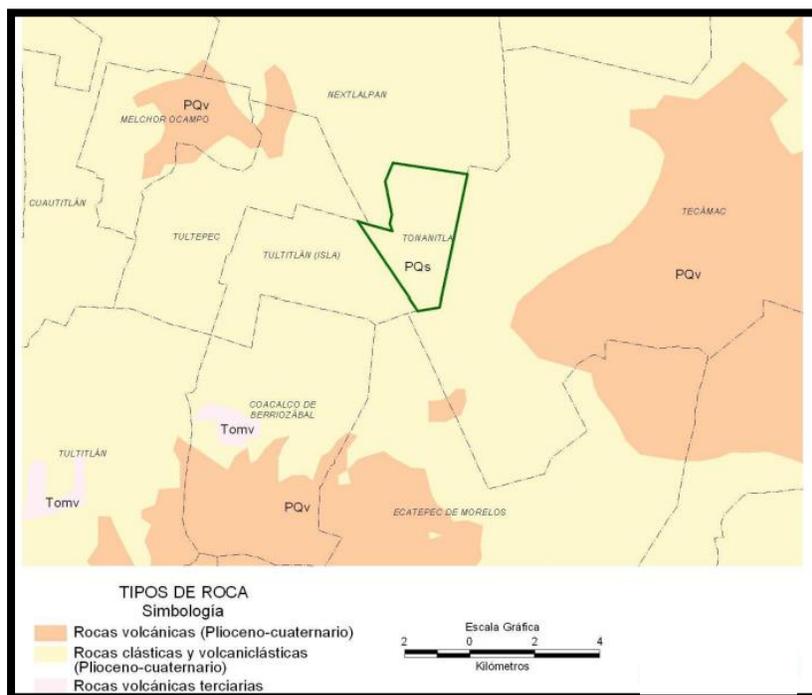


Figura 5.4. Geología del norte del Estado de México. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente (2010).

La historia de la región concuerda con la descripción del relieve, debido a que este tipo de rocas son acumulaciones mecánicas de partículas o sedimentos de rocas preexistentes, que en este caso provienen de rocas de origen volcánico tras un proceso de intemperización.

Los detritos o clastos, al ser erosionados fueron transportados y depositados en las inmediaciones de los que anteriormente formó parte del lago Zumpango-Xaltocan, hasta concluir en una textura clástica originando arcillas lacustres.

Los depósitos de arcillas lacustres cubren el 23 por ciento de elevaciones menos pronunciadas en el Valle de México, no obstante inferior a la capa de este tipo de materiales se encuentra interestratificado depósitos de basalto que datan desde el Pleistoceno (SMA, 2010:11).

Edafología

INEGI en el prontuario de información geográfica municipal (2009) indica que en el área municipal de Tonanitla el suelo predominante es el de tipo Solonchak (figura 5.5). Esta palabra deriva del idioma ruso del cual *sol* significa sal y *chak* hace referencia a un área salina (SMA, 2010: 11).

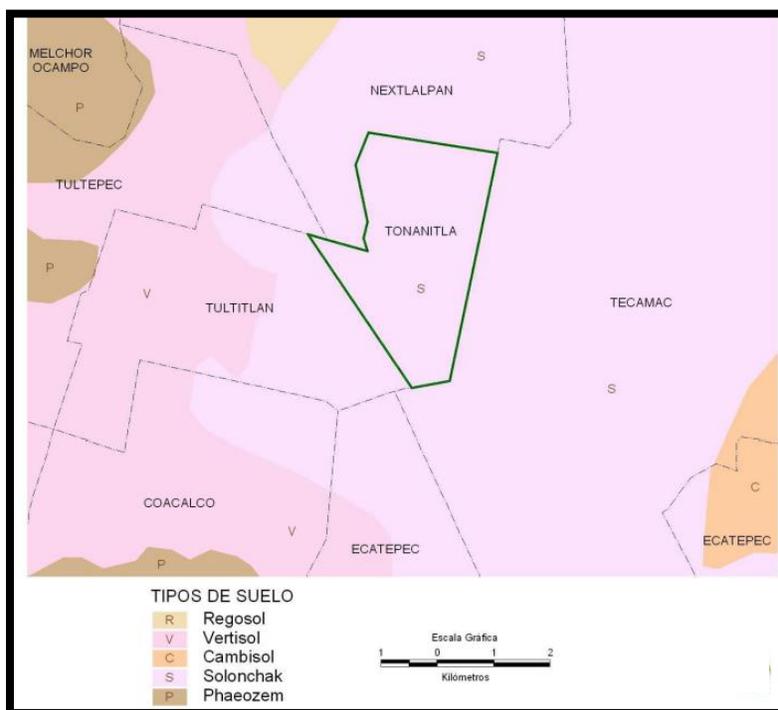
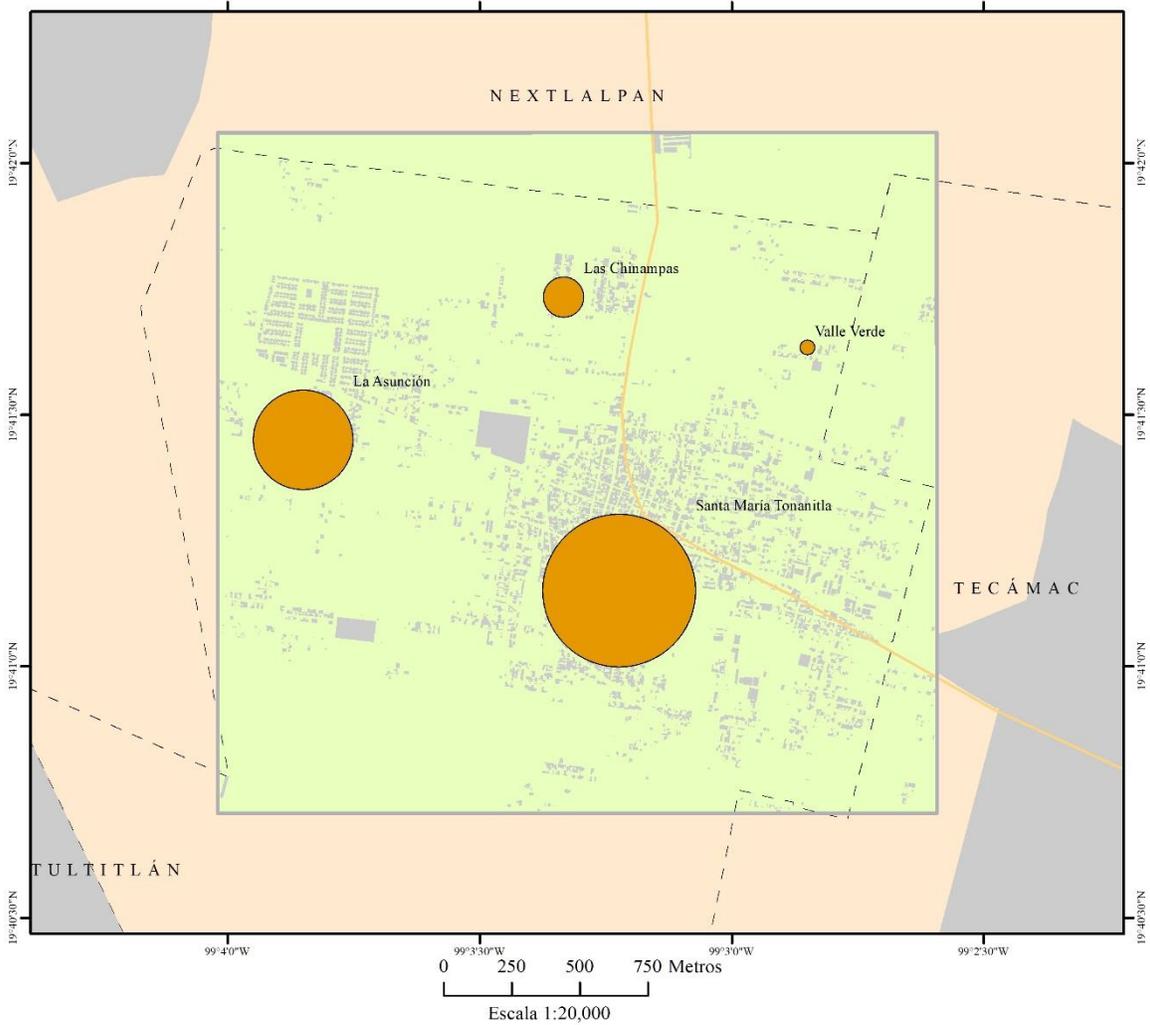


Figura 5.5. Edafología del norte del Estado de México. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente (2010).

La FAO (2008) menciona que este tipo de suelos se caracterizan por su elevado contenido de sales, el reducido contenido de materia orgánica en los primeros 100 metros de profundidad, además, el pH en promedio es de 8.5, por otro lado, el material parental de este tipo de suelos lo constituyen cualquier material no consolidado.

5.1.5. Localidades

En la figura 5.6 se representa la superficie territorial municipal con el polígono correspondiente del área bajo estudio y la ubicación de las localidades, de la misma forma se añadió la información del tamaño de la población en el año 2010.



Delimitación

□ Límite del área de estudio

■ Área de estudio

Límite político-administrativo

□ Estatal

□ Municipal

Referencias geográficas

— Carreteras

■ Asentamientos humanos

Población (Habitantes)

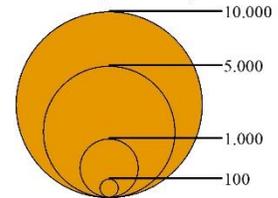


Figura 5.6. Localidades de Tonanitla (2018). Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico 2018.

El municipio está compuesto por un total de 7 localidades siendo Santa María Tonanitla la cabecera municipal y el asentamiento de mayor extensión. Cabe mencionar que 4 de 7 asentamientos se encuentran ubicados dentro del área de estudio, de los cuales 3 forman parte de la zona periférica de la cabecera.

5.1.6. Demografía

Crecimiento demográfico

Dado que Tonanitla es un municipio de reciente creación, no se dispone de datos provenientes de censos elaborados en periodos anteriores al año 2000. En la tabla 5.3 se muestra el crecimiento poblacional del Estado de México y Tonanitla a partir del 2000, es decir, tres años anterior a la fundación de la municipalidad.

<i>Año</i>	<i>Edo. Méx.</i>	<i>Tonanitla</i>	<i>% proporción estatal</i>
2000	13,096,686	6,170	0.05
2005	14,007,495	8,081	0.06
2010	15,175,862	10,216	0.07
2015	16,870,388	12,067	0.07

Tabla 5.3. Dimensión poblacional de Tonanitla (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.

De lo anterior, se registró que la población municipal creció un 95 por ciento en un periodo de 15 años, es decir, se añadieron 5 897 nuevos pobladores a la localidad.

Sin embargo, estos valores no superaron la unidad con respecto a la población de la entidad mexiquense, ya que, aunque el crecimiento fue inferior a lo presentado en Tonanitla (29 por ciento) en términos reales representó un aumento de 3.7 millones de habitantes (figura 5.7).

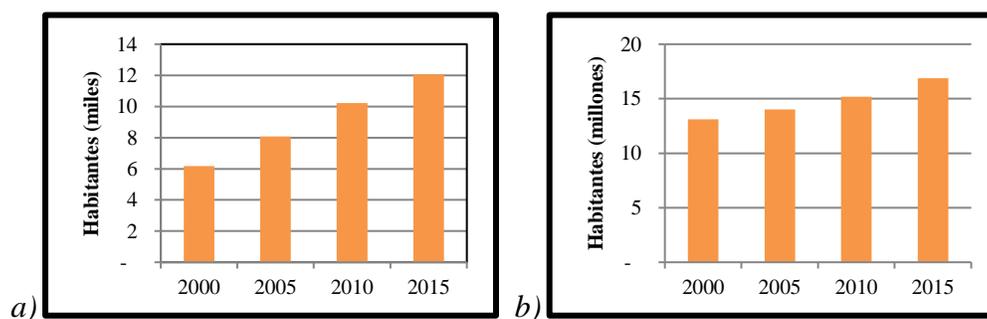


Figura 5.7. Crecimiento demográfico municipal (a) y estatal (b) (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.

Así mismo, en la tabla 5.4 se hace el desglose de población por cada asentamiento municipal y la diferencia en el valor absoluto, siendo Santa María Tonanitla, la cabecera municipal, la localidad con mayor número de habitantes concentrando un total de 6 774 pobladores.

SEDESOL (2015) con base en INEGI, indica que el 84 por ciento de los asentamientos del municipio son de tipo rurales, por lo que, únicamente la cabecera municipal se categorizó como una localidad urbana.

<i>Nombre</i>	Población (2005)	Población (2010)	Diferencia	Ámbito
<i>Santa María Tonanitla</i>	5,651	6,774	1,123	Urbano
<i>Colonia La Asunción</i>	2,004	2,881	877	Rural
<i>Colonia Pemex</i>	16	8	-8	Rural
<i>Colonia Las Chinampas</i>	372	480	108	Rural
<i>Valle Verde</i>	33	68	35	Rural
<i>San Bartolo</i>	5	5	0	Rural
Total:	8,081	10,216	2,135	

Tabla 5.4. Número de habitantes por asentamiento (2010). Fuente: Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).

Finalmente, en la tabla 5.5 se expone la proporción de la población por cada asentamiento en relación con el número total de habitantes del municipio de Tonanitla registrados en el año 2005 y 2010.

De forma que Santa María Tonanitla, cuyo asentamiento funge como cabecera municipal, concentra una proporción de población superior a 60 por ciento en ambos periodos analizados a pesar de la diferencia porcentual negativa de un 3.6.

Por otro lado, sobresale la proporción de la población de la Colonia PEMEX, Valle Verde y San Bartolo las cuales no sobrepasan la unidad con respecto al total municipal, por lo tanto la población tiende a asentarse en la porción norte de Tonanitla.

<i>Nombre</i>	% población	% población	Balance
	Municipal (2005)	Municipal (2010)	
<i>Santa María Tonanitla</i>	69.9	66.3	-3.6
<i>Colonia La Asunción</i>	24.8	28.2	3.4
<i>Colonia Pemex</i>	0.2	0.1	-0.1
<i>Colonia Las Chinampas</i>	4.6	4.7	0.1
<i>Valle Verde</i>	0.4	0.7	0.3
<i>San Bartolo</i>	0.1	0.0	0.0
<i>Total:</i>	100	100	

Tabla 5.5. Proporción de población municipal por asentamiento Fuente: Elaboración propia a partir de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).

En la figura 5.8, se muestra de manera esquemática la participación de cada asentamiento en la población total del municipio, para ambas temporalidades la Colonia Santa María Tonanitla y La Asunción concentran el 94 por ciento de los residentes.

Cabe destacar que para el año 2010 aumenta la proporción de la Colonia La Asunción en un 3.4 por ciento en contraste con la reducción del 3.6 de la cabecera municipal.

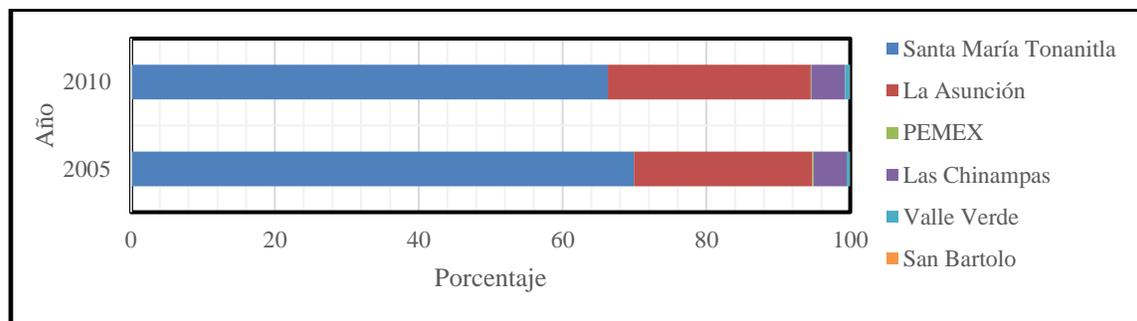


Figura 5.8. Proporción de población municipal por localidad. Elaboración propia a partir de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).

Dinámica de crecimiento demográfico

El valor real de la población al estar calculado por una cantidad considerable de variables dista de ser número estático, por lo que para tipificar el ritmo de aumento o decremento se ha empleado el uso de tasas.

La evolución del crecimiento poblacional tanto del Estado de México como de Tonalitla (Tabla 5.6) presenta una tendencia a aumentar el número de pobladores; las tasas se obtuvieron para tres periodos que corresponden a los años 2000-2005, 2005-2010 y 2010-2015.

	Tonalitla	Edo. Mex.	Diferencia
2000 - 2005	31.0	7.0	24.0
2005 - 2010	26.4	8.3	18.1
2010 - 2015	18.1	11.2	7.0

Tabla 5.6. Tasas de crecimiento quinquenales (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.

De la figura 5.9 se obtiene que existe una tendencia creciente en ambos casos, no obstante, las tasas de Tonalitla son superiores a las estatales siendo el 2000-2005 el periodo en el que se cuadruplicó este indicador.

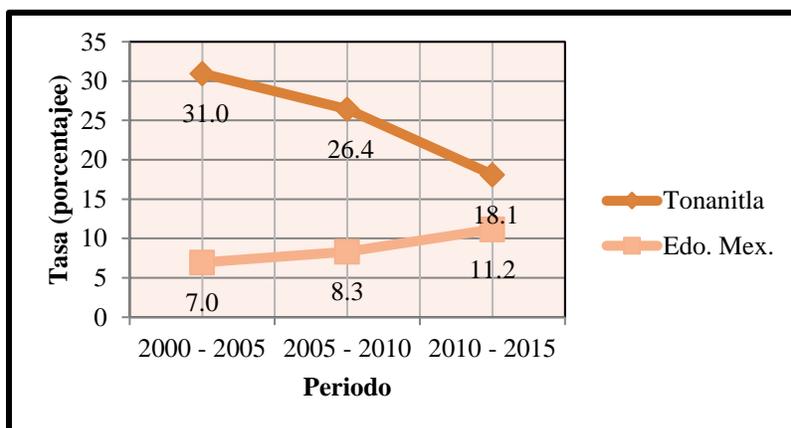


Figura 5.9. Tasas de crecimiento demográfico (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.

A pesar de que las tasas presentan un comportamiento positivo, es evidente la desaceleración del crecimiento, ya que se redujo un 13 por ciento en el periodo correspondiente al año 2010-2015, sin embargo el valor es muy alto lo que hace suponer movimientos migratorios hacia Tonalitla.

Por el contrario, en el comportamiento general del Estado de México de igual forma se registran valores positivos, inferiores a los del municipio, con un aceleramiento de 4.2 por ciento con respecto al valor mínimo.

La información recabada corresponde a las tasas acumuladas de 5 años, por lo que al realizar el análisis en una temporalidad anual se obtienen los resultados de la tabla 5.7.

	Tonanitla	Edo. Mex.	Diferencia
2000 - 2005	6.2	1.4	4.8
2005 - 2010	5.3	1.7	3.6
2010 - 2015	3.6	2.2	1.4

Tabla 5.7 Tasas de crecimiento anuales (2000-2015). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos 2000, 2010 y Conteos 2005 y 2015.

Del mismo modo, las tasas de crecimiento superan para el primer periodo por un aproximado de 4.8 por ciento, pero para el último bajo estudio la diferencia se reduce a 1.4.

A nivel municipal en el periodo 2005 a 2010 (tabla 5.8) el asentamiento que presentó un mayor ritmo de crecimiento poblacional fue la Colonia Valle Verde con una tasa anual de 10.3.

<i>Nombre</i>	Tasa	Tasa anual
<i>Santa María Tonanitla</i>	16.6	3.3
<i>Colonia La Asunción</i>	30.4	6.1
<i>Colonia Pemex</i>	-100.0	-20.0
<i>Colonia Las Chinampas</i>	22.5	4.5
<i>Valle Verde</i>	51.5	10.3
<i>San Bartolo</i>	0.0	0.0

Tabla 5.8. Tasas de crecimiento por localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).

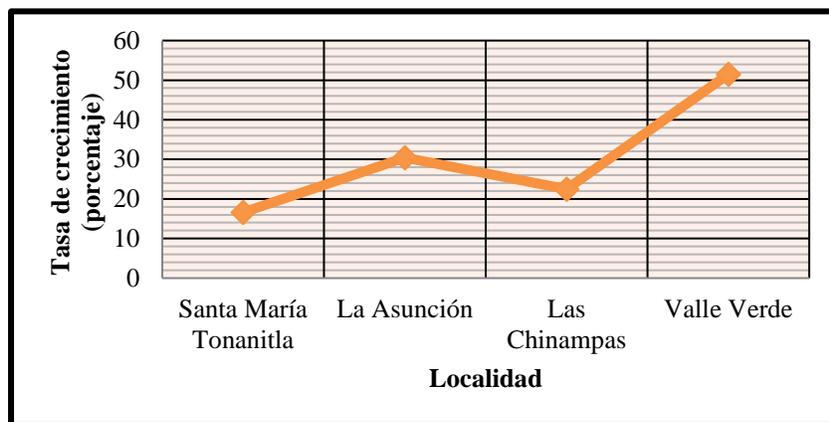


Figura 5.10. Tasas de crecimiento quinquenal por localidad (2005-2010). Elaboración propia de SEDESOL Cédulas de información municipal (2015).

Por otro lado, la población del asentamiento denominado San Bartolo permaneció constante y la Colonia Pemex en el periodo de 5 años perdió un 100 por ciento de la población.

Por su parte, las tasas tanto quinquenales como anuales de la Colonia Asunción superan las presentadas a nivel municipal y estatal. Los valores de Santa María Tonanitla se encuentran por debajo de los valores promedio de Tonanitla aunque superiores a los registrados por la entidad mexiquense.

Migración

Para este apartado se recabó información del Censo de Población y Vivienda 2010 acerca de la población que ha cambiado de lugar de residencia desde un municipio o delegación, entidad federativa o país de origen, a otro de destino. De igual forma, se obtuvieron los datos relacionados al lugar de nacimiento de los mismos.

Los indicadores relacionados con el lugar de residencia, se generan de la población mayor a 5 años. Para el año 2010 se tiene que el 95 por ciento de la población era residente de la entidad, esta tendencia es semejante al comportamiento general de la entidad (tabla 5.9).

	Tonanitla	Porcentaje	Edo. Méx	Porcentaje
<i>Residente en la entidad</i>	8,308	92.7	12,843,671	95.7
<i>Residente en otra entidad</i>	652	7.3	583,607	4.3
<i>Total</i>	8,960	100	13,427,278	100

Tabla 5.9. Lugar de residencia de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

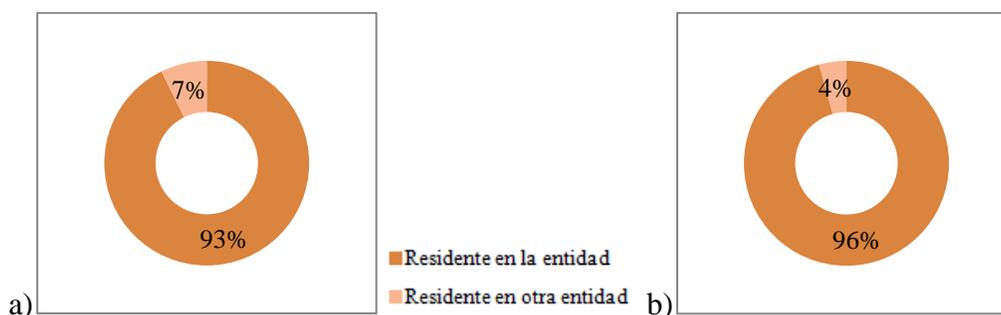


Figura 5.11 Lugar de residencia de población de Tonanitla(a) y Estado de México (b) (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

Del mismo modo, en cuanto al lugar de nacimiento el comportamiento municipal corresponde al estatal, ya que, aproximadamente una tercera parte de la población nació fuera del Estado de México (tabla 5.10).

	Municipal	%	Estado	%
<i>En la entidad</i>	6,326	61.9	9,341,942	61.6
<i>Otra entidad</i>	3,780	37.0	5,566,585	36.7
<i>EUA</i>	15	0.1	30,025	0.2
<i>Otro país</i>	3	0.0	20,617	0.1
<i>No especificado</i>	92	0.9	216,693	1.4
<i>Total</i>	10,216	100.0	15,175,862	100.0

Tabla 5.10. Lugar de nacimiento de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

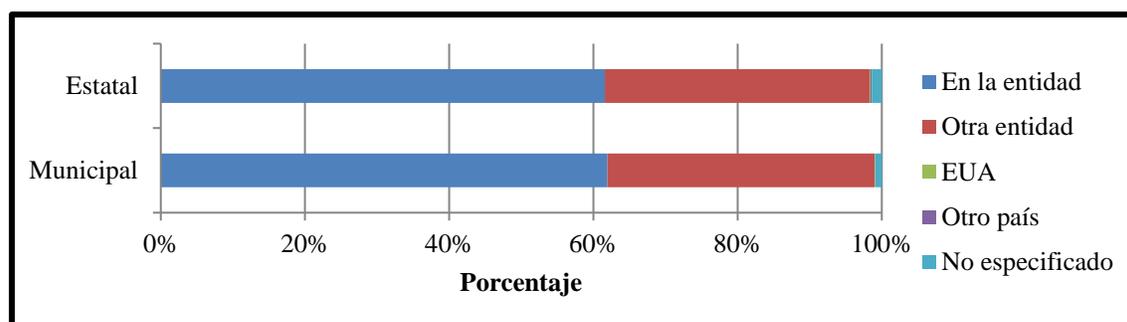


Figura 5.12 Comparativa de lugar de nacimiento estatal y municipal (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

Una proporción inferior a la unidad corresponde a personas nacidas en Estados Unidos, en otros países y en registros cuyos datos relacionados con este rubro no fueron especificados.

Adicionalmente, a nivel estatal 3,455,127 habitantes nacieron en la Ciudad de México, es decir 22.6 por ciento, en Tonanitla se contabilizó un total de 2,327 habitantes nacidos (22.8 por ciento) en la Ciudad de México, por lo tanto la capital nacional es la entidad que aporta mayor número de habitantes tanto al Estado como a la configuración demográfica municipal.

En cuanto al lugar de residencia por asentamientos (tabla 5.11), por restricciones de confidencialidad se obtuvo la información de 4 de los 6 que componen al municipio para el año 2010 según datos del Censo de Población y Vivienda.

<i>Localidad</i>	Total	Reside en la entidad	Residente en otra entidad	% en la entidad	% en otra entidad
<i>Santa María Tonanitla</i>	5,982	5,814	168	97.2	2.8
<i>La Asunción</i>	2,482	2,045	437	82.4	17.6
<i>Las Chinampas</i>	426	384	42	90.1	9.9
<i>Valle Verde</i>	57	52	5	91.2	8.8

Tabla 5.11. Lugar de residencia de pobladores de Tonanitla. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

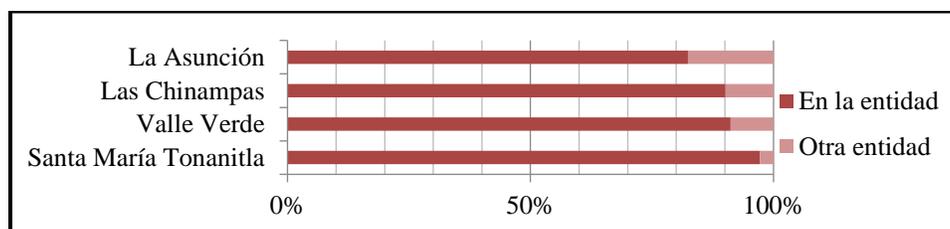


Figura 5.13. Lugar de residencia por localidad (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

Se obtuvo que la Colonia La Asunción, es el asentamiento con mayor proporción de pobladores cuyo lugar de residencia en 2005 se encontraba fuera de la entidad mexiquense, cabe destacar que el valor es superior al registrado tanto a nivel municipal como estatal.

Por otro lado, la cabecera municipal es el asentamiento con el menor dinamismo en cuanto al cambio de lugar de residencia ya que registró valores inferiores al tres por ciento. Dicho comportamiento corresponde a la tendencia de la escala municipal y estatal.

El comportamiento de la Colonia La Asunción de recepción de emigrantes se acentúa con los valores provenientes del lugar de nacimiento (tabla 5.12), ya que en el año 2010 se contabilizaron 1,690 personas nacidas en otra entidad, superando en 542 habitantes a los nacidos en el Estado de México, representando una proporción superior al 60 por ciento.

<i>Localidad</i>	Total	Nacida en la entidad	Nacida en otra entidad	% en la entidad	% en otra entidad
<i>Santa María Tonanitla</i>	6,774	4,894	1,815	72.2	27.8
<i>La Asunción</i>	2,881	1,148	1,690	39.8	60.2
<i>Las Chinampas</i>	480	235	243	49.0	51.0
<i>Valle Verde</i>	68	38	30	55.9	44.1

Tabla 5.2. Lugar de nacimiento de pobladores de Tonanitla por localidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

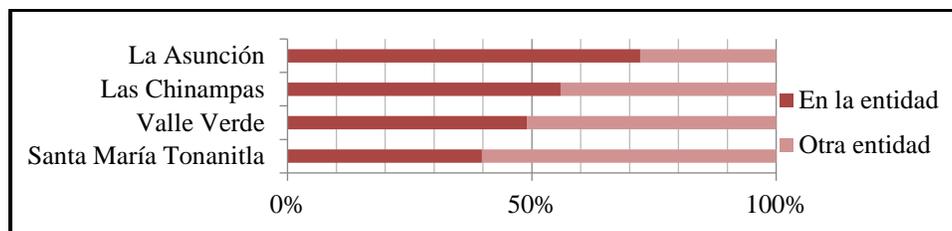


Figura 5.14 Lugar de nacimiento por localidad (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010

Por el contrario Santa María Tonanitla es el asentamiento con una menor proporción de habitantes nacidos en otra entidad registrando valores inferiores al 28 por ciento, no obstante en términos absolutos el número de pobladores nacidos en otra entidad supera al de la Colonia Asunción en 125.

Al realizar una comparativa a nivel municipal, estatal y en localidades es Santa María Tonanitla el asentamiento que presenta una dinámica de crecimiento natural de la población, por el contrario la Colonia La Asunción destaca por la acelerada tendencia de incorporar pobladores provenientes de otras entidades.

5.1.7. Vivienda

La vivienda según INEGI (Citado en Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2006), se trata de un espacio delimitado normalmente por paredes y techos de cualquier material, con entrada independiente, la cual es usada para actividades como dormir, preparar los alimentos, comer y que además funge como protección a las condiciones del ambiente.

El factor de la vivienda es una variable ampliamente relacionada con el crecimiento poblacional, debido a que un mayor número de habitantes requiere la apertura de nuevos espacios de la vivienda. No obstante, el aumento de los habitantes no garantiza la proliferación de áreas habitacionales, generando como consecuencia fenómenos como la hacinación.

A continuación se expone un análisis comparativo de tres aspectos relacionados a la temática de la vivienda. El primero, aborda los valores oficiales en cuanto al número de viviendas particulares independientemente de los aspectos funcionales que se deben de cubrir.

El segundo, examina la configuración y conformación de las viviendas a nivel estatal, municipal y localidad. Y tercero, expone aspectos relacionados a la satisfacción de las necesidades básicas de sus ocupantes tales como drenaje, agua, energía eléctrica, entre otros.

El número de viviendas dentro de las categorías espaciales de análisis distan de ser una variable constante, ya que en el municipio de Tonanitla durante el periodo 2005 a 2010 ha aumentado un 33 por ciento el número de viviendas particulares habitadas superando en 20 unidades porcentuales a lo registrado a nivel estatal (tabla 5.13).

<i>Asentamiento</i>	Viviendas		Diferencia	
	2005	2010	Absoluta	Relativa
<i>Santa María Tonanitla</i>	1,216	1,533	317	26.1
<i>La Asunción</i>	481	721	240	49.9
<i>La Chinampa</i>	79	120	41	51.9
<i>Valle Verde</i>	7	15	8	114.3
<i>Tonanitla</i>	1,786	2,392	606	33.9
<i>Edo. de Mex.</i>	3,243,566	3,689,053	445,487	13.7

Tabla 5.3. Viviendas particulares habitadas a nivel estatal, municipal y localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005

Desde otro punto de vista, al examinar la dinámica de los asentamientos municipales (figura 5.15), se obtiene que la Colonia Valle Verde fue la localidad que presentó un mayor dinamismo, ya que en el mismo periodo, aumentó 114 por ciento.

Al contrario, Santa María Tonanitla fue el asentamiento con el menor ritmo de crecimiento, no obstante el valor supera a lo obtenido a nivel estatal, en cambio al examinar los valores reales, se tiene que la cabecera municipal fue el asentamiento que integró un mayor número de viviendas.

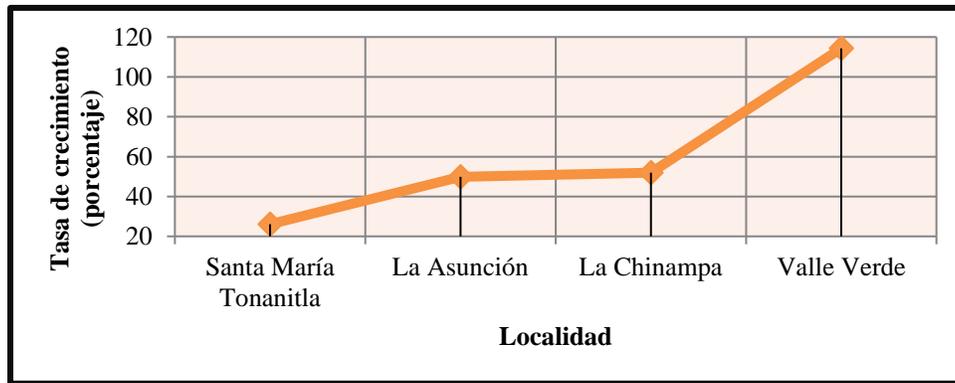


Figura 5.15. Tasa de crecimiento quinquenal de viviendas por localidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005

Posteriormente, con lo que respecta a la configuración de las viviendas (tabla 5.14) se tiene que en las categorías de análisis bajo estudio predomina un promedio de cuatro habitantes por vivienda, la cual dicha tendencia para el año 2010 se orientó a la reducción del número de ocupantes.

Localidad	Promedio habitantes por vivienda		Ocupación por cuarto		% Viviendas de un cuarto	
	2005	2010	2005	2010	2005	2010
Santa María Tonanitla	4.65	4.39	1.25	1.16	10.8	8.8
La Asunción	4.17	3.96	1.36	1.17	6.4	6.9
La Chinampa	4.71	4	1.52	1.16	16.5	7.5
Valle Verde	4.71	4.53	1.5	1.36	14.3	0.0
Edo. de Mex.	4.31	4.06	1.11	1.06	6.8	6.8
Tonanitla	4.52	4.24	1.28	1.17	9.9	8.1

Tabla 5.14. Características de los espacios de viviendas particulares habitadas a nivel estatal, municipal y localidad (2005-2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005

El número de ocupantes por habitación, presenta un comportamiento semejante tanto a nivel municipal como estatal, debido a que en promedio por cada cuarto habita menos de dos residentes. De igual forma, para el año 2010, la tendencia se encaminó a disminuir el número.

Dentro de la Constitución Política Mexicana se establece que debe de establecer las condiciones para la vivienda digna y bajo dicho eje se han realizado numerosas clasificaciones operativas. Así, por ejemplo el Programa Sectorial de Vivienda (Citado en Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2006), la vivienda adecuada debe cumplir aspectos como el número máximo de habitantes por cuarto habitable, el cual no debe superar el valor de 2.5.

De modo que en el municipio de Tonanitla en el año 2010, el 8.1 por ciento de las viviendas estaban constituidos únicamente por un cuarto habitable, valor que supera la media estatal. En cuanto a los asentamientos que conforman el municipio, es la cabecera municipal la localidad con un mayor número de espacios con una habitación, registrando un valor de 8.8 el cual excede del promedio municipal y estatal.

Otro elemento considerado por el Programa Sectorial de Vivienda (Citado en Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2006), es el que las viviendas cuenten con servicios básicos como el agua entubada en el interior, contar con drenaje y energía eléctrica.

Las características anteriormente mencionadas se exponen en la tabla 5.15, a su vez se muestra la información relacionada al piso de tierra debido a que repercute directamente con aspectos como la habitabilidad, salubridad y la vulnerabilidad frente al medio físico.

<i>Servicio</i>	Año	Edo. de Mex.	Tonanitla	Santa María Tonanitla	La Asunción	La Chinampa	Valle Verde
<i>Piso de tierra</i>	2010	3.8	2.3	1.8	3.1	3.3	6.7
	2005	5.2	2.7	2.0	3.1	10.1	28.6
<i>Sin electricidad</i>	2010	0.8	1.1	0.9	1.1	0	33.3
	2005	6.3	9.1	3.2	24.7	5.1	0
<i>Sin agua entubada</i>	2010	7.8	8.4	6.3	11.4	5	100
	2005	11.7	10.0	3.9	25.8	6.3	0
<i>Sin drenaje</i>	2010	5.3	2.6	2.3	3.1	0.8	0
	2005	6.6	2.7	2.8	1.7	7.6	0

Tabla 5.15. Carencia de acceso a los servicios básicos en las viviendas particulares habitadas (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Censos de Población y Vivienda 2010 y Conteo 2005

En relación con el piso de tierra es la colonia Valle Verde el asentamiento con un mayor número de viviendas con esta característica en ambos periodos bajo estudio. Este asentamiento se ubica en la porción noreste del municipio y el cual, de acuerdo con el Atlas Municipal de Riesgos (2012) corresponde a asentamientos irregulares.

De igual forma, para el año 2010 la colonia Valle Verde careció del servicio de electricidad en un 33 por ciento y de agua entubada con un 100 por ciento.

La colonia La Asunción destaca en el ámbito de viviendas sin drenaje, registrando un valor de 3 por ciento superando el promedio municipal. Cabe destacar que en este asentamiento para el periodo de 2010, se caracterizó por ser el de mayor dinamismo en cuanto a la acogida de población nacida en otra entidad (tabla 5.12).

De forma global, el municipio sobrepasa la media estatal en los rubros de viviendas sin electricidad y sin agua entubada, sin embargo, el valor porcentual es inferior en cuanto a la proporción de espacios habitables sin drenaje y viviendas con piso de tierra.

En resumen, el municipio de Tonanitla se caracteriza por su marcada tendencia a aumentar el número de viviendas, no obstante, la generación y apertura de estas no garantiza la incorporación del conjunto de las “características básicas de habitabilidad” (Programa Nacional de Vivienda, 2019).

Tonanitla, a pesar de ser uno de los municipios con menor número de habitantes presenta carencias en política pública vinculado al espacio habitacional, ya que, se presentan problemas como hacinación y la carencia de uno o más servicios básicos en las localidades que la conforman, afectando en el bienestar de pobladores de asentamientos desprovistos como la Colonia Valle Verde, ubicada en la periferia de la cabecera municipal.

5.1.8. Marginación

De acuerdo con CONAPO (2016) la marginación es un fenómeno multidimensional y estructural, el cual se asocia con la carencia de oportunidades sociales y la ausencia de capacidades para generarlas, también se incluye aspectos como la inaccesibilidad a los bienes y servicios básicos para el bienestar.

Las comunidades categorizadas como marginadas, se encuentran expuestas a condiciones de elevada vulnerabilidad social, cuya mitigación excede de las decisiones individuales o familiares debido a que situaciones corresponden a un modelo productivo que no brinda a todos las mismas oportunidades, configurando escenarios cada vez más desfavorables.

Para caracterizar dicho fenómeno, CONAPO ha generado el Índice de Marginación, dicho indicador analiza las desventajas sociales, las carencias de la población así como identificación de los espacios marginados según el grado o intensidad.

La construcción del Índice corresponde a las condiciones de cuatro ejes: población con carencia de educación básica, la presencia de los servicios básicos de las viviendas, el ingreso monetario y la distribución de la población según el tamaño de localidad.

En la tabla 5.16 se exponen los valores registrados a nivel municipal en los periodos de 2005, 2010 y 2015. Se obtuvo que el grado de marginación de la temporalidad más reciente es bajo, el cual posiciona al municipio de Tonanitla en el puesto número 76 de los 125 que componen la entidad mexiquense.

Año	Índice	Grado	Nivel nacional	Nivel estatal
2005	-1.311	Muy bajo	2242	92
2010	-1.159	Bajo	2138	*
2015	-1.072	Bajo	2110	76

Tabla 5.16. Índice y grado de marginación municipal, 2005-2015. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).

No obstante, a pesar de que las condiciones municipales lo caracterizan con un nivel bajo de marginación, para el año 2005 se catalogó como una de grado muy bajo, es decir en un periodo de 5 años desmejoró la situación de Tonanitla ya que se registró una diferencia de .240 en el valor del índice.

A nivel localidad (tabla 5.17), se tiene que para el periodo correspondiente al 2005 el asentamiento con menor rezago fue la cabecera municipal ya que se categorizó con un grado muy bajo de marginación, sin embargo, en el siguiente periodo de análisis, Santa María Tonanitla escaló una categoría en la clasificación de este rubro.

Localidad	Índice 2005	Índice 2010	Grado 2005	Grado 2010
Santa María Tonanitla	-1.377	-1.207	Muy bajo	Bajo
La Asunción	-1.332	-1.244	Bajo	Bajo
Las Chinampas	-1.018	-1.134	Medio	Bajo
Valle Verde	-0.785	-0.332	Medio	Alto

Tabla 5.17. Índice y grado de marginación por localidad, 2005-2010. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).

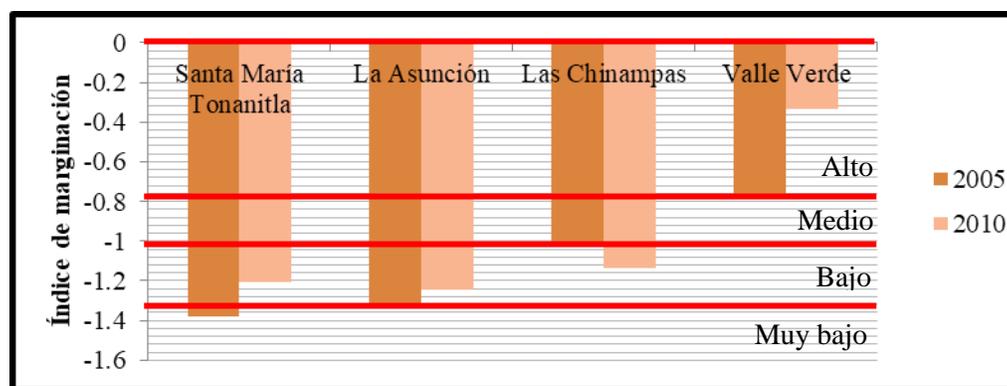


Figura 5.16 Índice de marginación a nivel localidad 2005-2010. Fuente: Elaboración propia a partir de Datos abiertos del Índice de Marginación (2016).

Caso contrario ocurrió con el asentamiento Valle Verde puesto que para el año 2005 las características lo ubicaron en un grado medio, no obstante en el 2010 se catalogó con un alto grado de marginación debido al déficit principalmente en el ámbito de calidad de vivienda y distribución de la población en asentamientos aislados.

En síntesis, el nivel de marginación del municipio en general es bajo, no obstante al desgregar la información a nivel asentamiento destaca la cabecera municipal como la localidad con una mayor atención de las necesidades de la población debido a la presencia de infraestructura y equipamiento urbano. Por otro lado, la Colonia La Asunción y Las Chinampas han permanecido en un periodo de 5 años en condiciones semejantes de marginación baja.

Sin embargo, con los valores obtenidos para Valle Verde evidencian las desventajas sociales y las carencias de la población impidiendo la participación de los beneficios de la dinámica municipal, de esta forma se ejemplifica la desigualdad del comportamiento de la marginación dentro de una misma unidad territorial.

5.1.9. Características catastrales

De acuerdo con la guía técnica de la administración de catastro municipal (INAFED, 2010: 2), indica que el catastro es el censo analítico de la propiedad inmobiliaria, el cual tiene como objetivo registrar, ubicar y describir las características físicas de los bienes inmuebles ubicados en el territorio municipal.

La información del catastro comprende principalmente dos aspectos:

- El inventario de los inmuebles del territorio municipal así como de los propietarios
- La determinación del valor de los inmuebles, con el fin de obtener el valor catastral con la finalidad de sustentar el cobro del impuesto predial

En el presente apartado se expondrá las cifras obtenidas por el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México en cuanto al valor catastral a nivel municipal (tabla 5.18).

<i>Municipio</i>	2015		2016		2017	
	Claves catastrales	Valor Catastral (MDP)	Claves catastrales	Valor Catastral (MDP)	Claves catastrales	Valor Catastral (MDP)
<i>Coacalco</i>	81,460	50,601.29	81,460	52,209.57	82,570	71,035.62
<i>Ecatepec</i>	420,284	284,829.70	423,005	310,934.75	422,760	232,577.58
<i>Jaltenco</i>	9,134	2,887.72	9,222	3,032.35	9,401	3,142.46
<i>Nextlalpan</i>	21,183	6,264.19	22,194	6,731.93	22,568	6,951.52
<i>Tecámac</i>	199,841	154,886.57	199,841	105,607.29	199,841	108,656.00
<i>Tonanitla</i>	4,212	1,349.85	4,297	1,399.13	5,328	2,230.53
<i>Tultitlán</i>	140,538	87,651.94	140,567	91,190.99	140,766	94,394.66
<i>Estatlal</i>	3,826,030	2,963,024.40	3,930,450	3,074,548.78	3,978,295	3,139,205.44

Tabla 5.18. Valor catastral en millones de pesos y claves catastrales (2015-2017). Fuente: IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).

En la tabla 5.18, se recopilaron los datos del valor catastral y del número de claves catastrales tanto del municipio de Tonanitla como de los municipios colindantes. En definitiva, el total obtenido para el área de estudio es el más reducido en comparación con los 7 municipios, registrando una diferencia de 230 millones de pesos en relación con el municipio de Ecatepec.

De la misma forma sucede en cuanto al número de claves catastrales, ya que, en Tonanitla se contabilizaron para el año 2017 un total de 5 328 predios, en contraste con las 422 760 del municipio de Ecatepec.

Mientras tanto, los datos de valor y claves catastrales de los municipios de Jaltenco y Nextlalpan presentan un comportamiento semejante a lo obtenido en el las cifras Tonanitlenses (Figura 5.17 y 5.18).

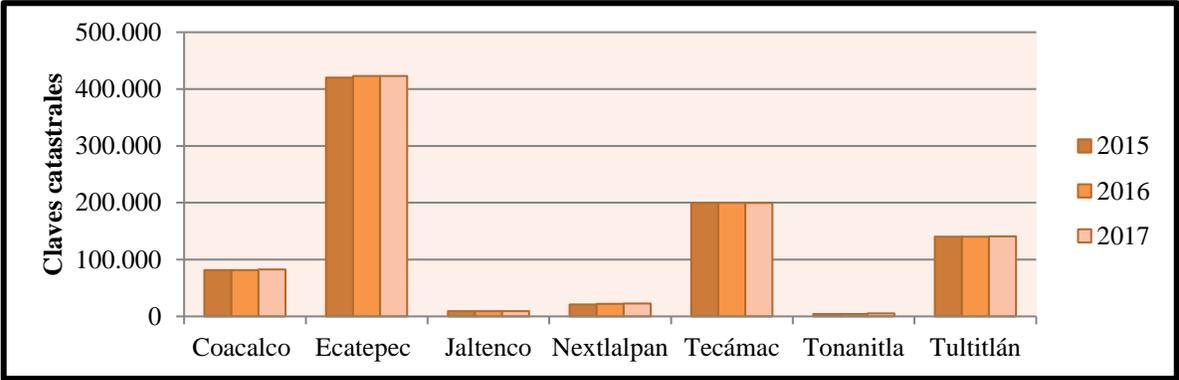


Figura 5.17. Claves catastrales de los municipios colindantes del Tonanitla 2015-2017. Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).

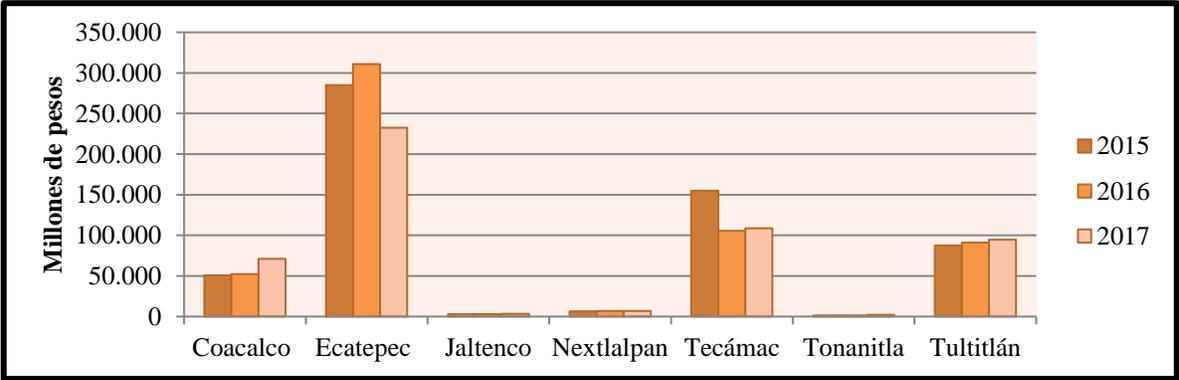


Figura 5.18. Valor catastral de los municipios colindantes del Tonanitla 2015-2017. Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).

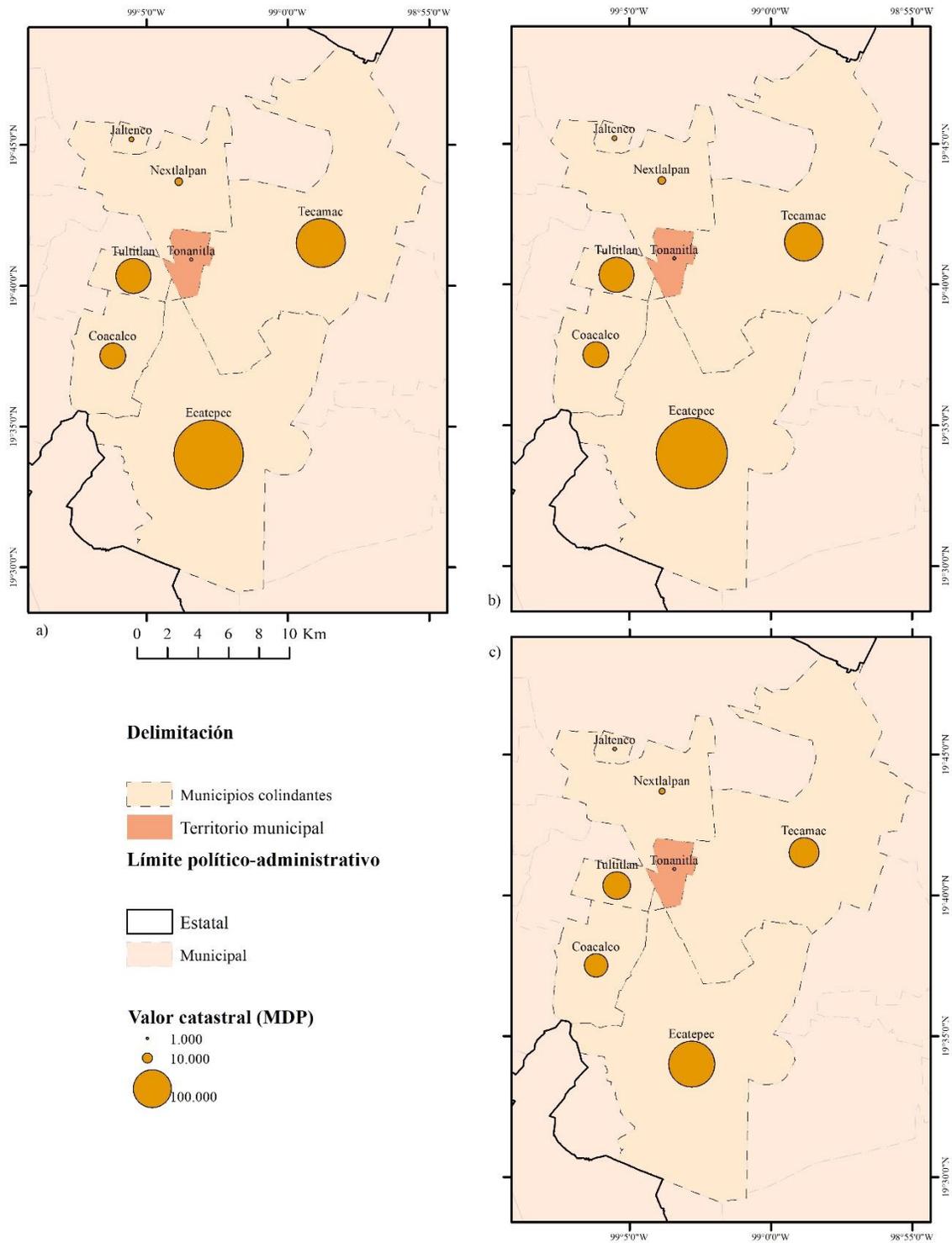


Figura 5.18. (Continuación). Valor catastral de los municipios colindantes del Tonanitla 2015(a), 2016(b) y 2017(c).
Fuente: Elaboración propia a partir de IGCEM. Dirección de Catastro. (2018).

En cuanto a la caracterización del área de estudio para el año 2017, en Tonanitla se contabilizaron un total de 5 329 claves catastrales (tabla 5.19), estas corresponden al número identificador de los predios en el catastro.

<i>Claves catastrales</i>			Proporción de claves catastrales	
<i>Total</i>	Urbanas	Rústicas	Urbanas	Rusticas
5,328	4,671	657	87.7	12.3

Tabla 5.19. Padrón catastral del municipio de Tonanitla 2017. Fuente: Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).

De lo anterior se obtiene que, el 88 por ciento de las claves catastrales en el municipio de Tonanitla pertenecen a predios registrados con características urbanas, es decir, se trata de un terreno, lote o fracción localizados dentro del perímetro urbano o el fundo legal de las poblaciones (INAFED, 2010: 13).

Por otro lado, 12 por ciento de las claves catastrales municipales se adscribieron dentro de las características de predios rústicos, puesto que se localizan en la zona rústica o rural ibíd..

En otra categoría de análisis, se determinaron áreas homogéneas de los usos de suelo en el municipio, entre las que se encuentran los predios urbanos clasificados como habitacionales de tipo popular, precario y de interés social. La única categoría rústica registrada en el padrón catastral municipal es el de tipo agrícola temporal (tabla 5.20).

<i>Nombre de área homogénea</i>	Código	Uso de suelo	Valor catastral (Pesos/m²)
<i>Santa María Tonanitla</i>	H2	Habitacional popular	334
<i>Colonias</i>	H1	Habitacional precario	291
<i>Villas de Santa María (La Asunción)</i>	H3	Habitacional interés social	1,152.00
<i>Pequeña propiedad</i>	A4	Agrícola de temporal	38

Tabla 5.20. Áreas homogéneas por uso de suelo y valor catastral por metro cuadrado (2017). Fuente: Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).

El costo más elevado por metro cuadrado en el área de estudio corresponde al fraccionamiento de interés social de Villas de Santa María, el cual se ubica dentro de la Colonia la Asunción al oeste de la Santa María Tonanitla.

La pequeña propiedad, correspondiente a los predios de carácter rural es el área homogénea con menor valor catastral en el municipio, con un aproximado de 38 pesos por metro cuadrado, esto es 30 veces inferior al valor del área habitacional de interés social, 9 veces al de la cabecera municipal y 7 a lo obtenido por el conjunto de Colonias del municipio (figura 5.19).

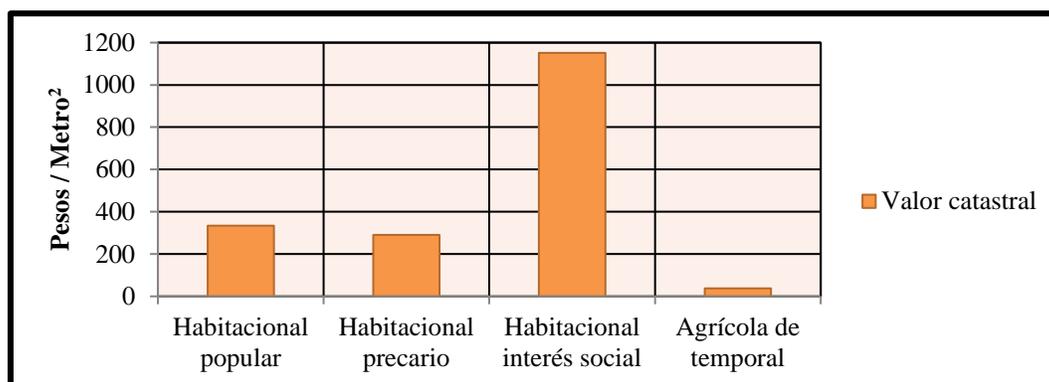


Figura 5.19. Valor catastral por metro cuadrado de Áreas homogéneas der uso de suelo (2017). Fuente: Elaboración propia a partir de IGECEM. Dirección de Catastro. (2018).

5.1.10. Tenencia de la tierra

De acuerdo con la información del marco censal agropecuario (INEGI, 2016) 373 terrenos conforman la totalidad del territorio, de los cuales carece predios bajo el régimen de tenencia Ejidal, Comunal, Colonias Agrícolas y de Propiedad Pública.

Por lo tanto el territorio municipal está constituido en un 100 por ciento por terrenos pertenecientes a la propiedad privada (tabla 5.21), siendo en conjunto con Papalotla, los 2 municipios del Estado de México con esa característica.

Municipio	Total de terrenos	Terrenos de propiedad privada	Proporción
Coacalco	21	18	64.5
Ecatepec	279	1	4.0
Nextlalpan	3287	817	33.3
Tecámac	4479	1371	55.5
Tultitlán	255	48	21.5
Tonanitla	373	373	100.0
Estatal	873,634	195,538	40.2

Tabla 5.21. Número de terrenos y proporción de propiedad privada (2016). Fuente: Elaboración propia a partir de Marco censal agropecuario (INEGI, 2016).

5.2. Urbanización en Tonanitla

5.2.1. Situación actual

El siguiente apartado tiene como finalidad señalar y describir los factores que caracterizan al crecimiento urbano del municipio de Tonanitla, los cuales, la interacción de dichas eventualidades han conllevado a la urbanización descentralizada característica del crecimiento de tipo dispersión.

En efecto, las situaciones identificadas en el área de estudio han influenciado directa o indirectamente en los cambios de uso de suelo y en la pérdida de espacios agrícolas, de igual forma la relación entre las causas ha originado el curso real de crecimiento urbano municipal.

Cabe mencionar que el área de estudio concentra al 99 por ciento de la población municipal, por lo que se trata de un territorio con una intensificación en cuanto a la transición de un paisaje rural a uno urbano en el que la dispersión urbana confirma la consolidación de la ciudad sobre el suelo tonanitlense.

5.2.2. Crecimiento demográfico

Acorde con la legislación nacional en materia de vivienda, las familias y la población general tienen derecho a la vivienda, la cual, se adscribe dentro de las necesidades básicas para el desarrollo de la sociedad en conjunto de otros rubros como el vestido y la alimentación.

Por su parte en el municipio de Tonanitla, indicadores como la proporción y el ritmo de crecimiento poblacional han superado los obtenidos a nivel estatal. Cabe mencionar que la entidad mexiquense destaca por poseer los registros nacionales más altos en cuanto a lo que refiere al crecimiento demográfico neto.

A nivel localidad, las tasas de crecimiento más elevadas corresponden a los asentamientos ubicados en la periferia de la Cabecera Municipal, lo que implica que la zona perimetral se ha tornado como un espacio alternativo para habitar en el contexto municipal.

En Tonanitla, el aumento en el número de residentes en el área de estudio está asociado con el incremento en el número de viviendas, puesto que en el periodo 2005 a 2010 acrecentó en 33 por ciento el total. De igual forma, el patrón de emplazamiento de las viviendas tiende a la densificación tanto de la zona central del municipio como de los asentamientos periféricos.

De manera que con los indicadores anteriormente citados, se refuerzan la hipótesis de que la periferia de la cabecera municipal se ha convertido en una alternativa para la apertura de nuevos espacios habitacionales, propiciando a medida que se dispersa la ciudad la reducción de la frontera agrícola municipal.

5.2.3. Tenencia de la tierra

Para la comprensión del proceso de crecimiento urbano en el área de estudio, será necesario el abordaje de las temáticas relacionadas con el valor del suelo en el municipio, ya que constituye un elemento que influye en la elección de emplazamiento de los nuevos espacios habitacionales.

En el apartado 5.1.9 se lleva a cabo una comparativa entre el valor catastral en tres niveles de análisis: valor catastral municipal, composición del catastro en Tonanitla y la subdivisión por áreas homogéneas.

De lo anterior, se obtuvo que el comportamiento de Tonanitla, en cuanto al valor catastral acumulado, es semejante a lo que acontece tanto en Jaltenco como Nextlalpan, los cuales comparten la característica de ser municipios con una urbanización creciente.

La dinámica reciente de los cambios de usos de suelo en los tres municipios anteriormente citados, es la sustitución del paisaje rural por uno en donde prolifera combinación de usos urbanos y agrícolas, el cual es una cualidad de la dispersión urbana.

Por otro lado, los municipios de Coacalco, Ecatepec, Tecámac y Tultitlan son territorios con usos de suelos urbanos consolidados y en los que se han adoptado un modelo de crecimiento urbano extensivo e intensivo.

Otro rasgo de Tonanitla, es la predominancia de las claves catastrales urbanas sobre las rústicas, ya que una proporción mayor a la tercera parte del total municipal corresponde a predios o terrenos de características urbanas.

Así mismo, se presentaron asimetrías en cuanto al valor catastral por áreas homogéneas dentro del territorio municipal, siendo los espacios clasificados como de tipo habitacional de interés social y habitacional precario, ubicados en la zona céntrica, los que registraron un mayor valor por metro cuadrado.

Contrario con lo que sucede con las Colonias Valle Verde y Las Chinampas que el coste del suelo es menor, convirtiéndose en un factor de atracción para la proliferación de asentamientos ubicados en la periferia de la Cabecera Municipal.

De forma que los precios más bajos por unidad de territorio pertenecen a los clasificados como del tipo agrícola de temporal correspondiente a la pequeña propiedad. En estos espacios se coexiste la reciente urbanización con predios parcelados sin servicios e infraestructura urbana básica.

Finalmente, la propiedad privada es el único tipo de tenencia tierra presente en el municipio, la cual tiene como característica principal de que pueden ser adquiridas o poseídas por medio de la escrituración de la propiedad, en contraste con los fines que se siguen en los terrenos ejidales y la figura de los campesinos posesionarios. A su vez, el municipio de Tonanitla destaca en rubro de la propiedad privada, debido a que sobrepasa la media estatal y también lo registrado en los municipios colindantes.

Por lo tanto, este escenario de generación de asentamientos aislados sobre terrenos agrícolas debido a los bajos costes, la reducción de la participación de las actividades agrícolas en conjunto con tenencia de la tierra, permite la venta de los predios y fomenta la proliferación del crecimiento urbano disperso dentro del área de estudio.

5.2.4. Coste de vida y falta de viviendas asequibles

El elevado coste de las viviendas en las diversas alcaldías céntricas de la Ciudad de México, es uno de los factores que propician la búsqueda de locaciones ubicadas en la periferia urbana como alternativa para la satisfacción de la necesidad de vivienda.

En el apartado 5.1.6.3. se expuso una serie de indicadores con el objetivo de cuantificar los movimientos migratorios hacia el territorio Tonaniltense. Entre los datos empleados destaca el lugar de residencia en un periodo anterior a la realización del censo y el lugar de nacimiento de los censados.

Se obtuvo que una proporción inferior al 10 por ciento residía en otra entidad, sin embargo, en lo que respecta al lugar de nacimiento de los pobladores del municipio, se obtuvo que aproximadamente el 40 por ciento provenía de otros estados y una proporción inferior de otros países.

A su vez, en el desglose por entidades, la proporción de habitantes provenientes de la Ciudad de México llegó a aproximadamente una cuarta parte de la población total, por lo que se infiere, en el periodo 2005–2010 desde la Ciudad de México se ejecutó la salida de residentes atraídas, entre otros motivos, por áreas cuyo coste de alojamiento y predios es menor en comparación a lo registrado en las Alcaldías centrales; de forma que se refuerza la capacidad receptora del municipio de Tonanitla de la creciente población.

A largo plazo se prevé un incremento de la demanda de espacios para las viviendas, cuya ubicación conllevará la densificación del área central perteneciente al casco urbano municipal, a las recientes aglomeraciones y en zonas periféricas que aún no han sido urbanizadas.

5.2.5. Medio físico

En la búsqueda de un espacio para la construcción de una vivienda existen una variedad de factores a elegir, la pendiente en conjunto con las características del subsuelo son dos de las principales características para determinar la capacidad de edificabilidad de un terreno

En primera instancia, las viviendas emplazadas sobre un área plana o de escasa elevación resultan en el momento de la construcción, una menor inversión en cuanto al acondicionamiento del terreno.

En el territorio municipal, las nulas barreras topografías y la homogeneidad de la superficie permiten que la urbanización se lleve a cabo de forma horizontal la cual es otra de las características del crecimiento urbano disperso.

Por otro lado, las características sedimentarias y del elevado contenido de sales en el suelo municipal condicionan las actividades agrícolas y representan un factor para la proliferación de los asentamientos humanos, no obstante a pesar de que se consideran factibles para urbanizar son vulnerables en cuanto a las actividades de cimentación, la poca permeabilidad facilita las inundaciones en temporadas de lluvia y a su vez la salinidad funge un papel determinante para el deterioro de los materiales de la vivienda.

5.2.6. Políticas de planeación ineficaces

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano del Estado de México (2018) los planes municipales de Desarrollo Urbano son el instrumento que contiene las disposiciones jurídicas para planear y regular el ordenamiento de los asentamientos humanos en el territorio municipal.

El texto tiene como objeto el establecer las políticas, las estrategias y los objetivos para el crecimiento urbano municipal. Se fundamenta mediante tareas como la determinación de la zonificación, las normas de uso y aprovechamiento del suelo, así como de las acciones a realizar en cuanto a la conservación, al mejoramiento y crecimiento previsto en los centros de población.

La situación actual de Tonanitla se caracteriza por la nula definición de estrategias que rijan el crecimiento urbano, esto se debe a la ausencia de un plan de desarrollo municipal actualizado y aprobado por la Comisión de Planeación Estatal, a pesar de ser responsabilidad de los Ayuntamientos la generación de este instrumento al inicio de cada periodo constitucional de gobierno.

Se debe agregar que en sustitución a los planes de desarrollo legales, existen documentos sin carácter oficial emitidos por los ayuntamientos municipales en curso y expedidos para periodos (2009-2012, 2013-2015 y 2016-2018), los cuales resalta el carácter enunciativo y con información desactualizada, ya que, corresponden a una compilación de trabajos realizados con anterioridad.

5.2.7. Incumplimiento de políticas de planeación

Una de las causas para la no definición de políticas de planeación es en primera instancia, la incapacidad de cuantificar y ubicar los predios urbanizados, los aptos para urbanizar y los rústicos dentro del territorio municipal.

Esta omisión conllevará tanto a corto como a largo plazo, en la incapacidad para conservar, recuperar y restaurar el equilibrio ecológico municipal en relación del crecimiento urbano con características sustentables.

De igual forma, entre las desventajas del incumplimiento de políticas de planeación y de la desactualización del diagnóstico socio territorial, destaca:

- La no definición de la vocación municipal para el aprovechamiento de las potencialidades territoriales y de los recursos naturales
- Indeterminación de áreas con algún grado de desequilibrio ecológico por efecto de los asentamientos urbanos
- Desconocimiento acerca del impacto en la calidad de vida de los pobladores y del medio ambiente tras la añadidura de nuevos asentamientos
- Falta de información que sustente nuevos proyectos en materia de desarrollo urbano, es decir, de servicios, equipamiento, infraestructura, crecimiento económico y conservación del medio ambiente.

Por otro lado, el emplazamiento de la urbanización en el territorio municipal no está asociado con la dotación de servicios urbanos básicos, sirva de ejemplo lo postulado en el plan de desarrollo correspondiente al año 2013-2015, dentro de la descripción de proyectos para el mejoramiento de la imagen urbana en el municipio, entre las propuestas destaca el incremento de la cobertura de los servicios de electrificación, agua potable y pavimentación.

No obstante, en el plan más reciente (2016-2018), pese al reconocimiento de la problemática, entre las estrategias para alcanzar los objetivos del desarrollo urbano en Tonanitla sobresale la centralización de las políticas, puesto que en las iniciativas se

enfatisa el mantenimiento y modernización de los servicios urbanos perteneciente a Santa María Tonanitla, la cabecera municipal

Finalmente, estos documentos sin carácter oficial carecen de fijación de plazos para el cumplimiento de los proyectos, los montos de acuerdo con cada estrategia, además de la no definición de responsabilidades delegadas a los organismos municipales.

De forma que la falta de intervención por parte de los distintos departamentos del ayuntamiento municipal, la carencia de información oficial como marco de referencia, así como la proliferación de la informalidad en cuanto a los medios para la urbanización y la desinformación acerca de la regularización son la algunos de los factores que propician el crecimiento urbano disperso fuera de un marco de gobernabilidad.

5.2.8. Disputas legales

En la periferia urbana, la ocupación informal del suelo surge como un recurso ante un escenario de expansión de crédito hipotecario selectivo. Esta práctica consiste en la división de predios no regularizados de territorios no contemplados en los programas de desarrollo urbano del municipio.

La práctica de compra venta del suelo de estas características, está asociado a transacciones que generalmente no están ligadas a los registros públicos, por lo que ni la propiedad del predio ni la propiedad final pueden ser acreditadas y por ende el valor por la adquisición de estos espacios es menor (Olivera, 2017).

De acuerdo con el Plan de Desarrollo (Ayuntamiento de Tonanitla, 2016:16) (Ayuntamiento de Tonanitla ,2013:50) y el Diagnóstico Ambiental (SMA, 2010: 16), en el municipio se lleva a cabo prácticas de cambio de vocación de predios rústicos a urbanos de forma irregular, es decir, sin la posesión de la tenencia de la tierra por parte de los proveedores y acreedores de los predios.

Esta actividad generalmente se localiza en ubicaciones periféricas a la cabecera municipal, situándose principalmente en el norte del municipio en porciones territoriales dispersas, destacando la Colonia Valle Verde el cual es un asentamiento reconocida por el Ayuntamiento de Tonanitla por su origen irregular.

La Colonia Valle Verde en conjunto con las viviendas ubicadas en parcelas agrícolas, corresponden a una urbanización con ritmo de crecimiento progresivo, en el que su emplazamiento no está relacionado a ningún programa de proyecto urbano.

De igual forma, al ser asentamientos humanos no regularizados, normalmente no cuentan con el acceso a los servicios ni al equipamiento urbano indispensable, los cuales funcionan como variables para la medición de la calidad de vida de los pobladores.

En resumen, las viviendas sin seguridad jurídica de la tenencia ubicadas en la sección norte del área de estudio se asocian en general a condiciones de marginación, en específico en la cuestión de la accesibilidad física, así mismo se vincula con predios urbanos los cuales se encuentran subequipados.

5.3. Usos de suelo

Las características de los usos de suelo surgen como consecuencia de la interacción entre los componentes del medio físico, la gestión política-administrativa y la acción por parte de las sociedades, por tanto, la vocación de los predios no funcionan con los mismos propósitos.

El número y tipo de clases para la evaluación de los cambios de uso de suelo usados para clasificar el territorio de Tonanitla se tomaron únicamente a partir de los tipos propuestos por el sistema de clasificación de la FAO (2000), sin la implementación de las clases y subclases. Lo anterior se debe a la resolución de las imágenes empleadas y la extensión del área.

Para la definición de los tipos se requirió la visualización de imágenes aéreas, la capacidad de los sistemas de información geográfica para clasificación automatizada y manual de los usos de suelo

Complementado con los conocimientos previos del territorio y de la investigación cuantitativa sobre las tendencias y transformaciones, se eligieron las siguientes categorías en función de la vocación y características del territorio.

5.3.1. Tipos de usos de suelo

Áreas terrestres cultivadas y gestionadas:

Esta clase se refiere a áreas donde la vegetación natural ha sido eliminada o modificada y reemplazada por otros tipos de cubierta vegetal de origen antropogénico. Esta vegetación es artificial y requiere actividades humanas para mantenerla a largo plazo.

Entre las actividades humanas, o antes de comenzar el cultivo, la superficie puede estar temporalmente sin cobertura vegetal, pero su apariencia fenológica estacional puede ser modificada regularmente por los humanos con prácticas como la labranza, cosecha o irrigación (figura 5.20).



Figura 5.20. Cultivos de secano, 2012: Fuente: Google Maps.

En esta se incluye a las áreas con o sin parcelamiento en los cuales se lleva a cabo la explotación de cultivos estacionales o de riego, así como de plantaciones forestales de árboles, existentes en parques urbanos (figura 5.21).



Figura 5.21. Vegetación urbana en Santa María Tonanitla, 2013. Fuente: Google Maps.

Vegetación natural y semi-natural:

Las áreas con vegetación natural se definen como áreas donde la cubierta vegetal está en equilibrio con las fuerzas abióticas y bióticas de su medio ambiente. Por su parte, la vegetación seminatural corresponde a la vegetación no plantada por humanos pero influenciada por acciones humanas. Estas pueden ser resultado de actividades como pastoreo, tala selectiva o áreas de cultivo abandonadas y donde la vegetación se está regenerando.

Para el área de estudio a esta categoría corresponde a zonas con o sin parcelamiento cubiertas por matorrales xerófilos y pastizales. Entre las actividades que se llevan a cabo en este uso es su utilización como alimentación para el ganado equino y bovino (figura 5.22).



Figura 5.22. Actividad pecuaria, 2013: Fuente: Google Maps.

Superficies artificiales y áreas asociadas:

En este uso de suelo se engloban las áreas con evidencia de degradación a causa del desmonte total o parcial de la vegetación nativa o de cultivos, asociado generalmente a las áreas previas a la urbanización.

De igual forma, estas superficies se caracterizan por la poca o nula cobertura vegetal y la proliferación de áreas pavimentadas, de roca desnuda, arenas o suelo descubierto (figura 5.23).



Figura 5.23. Territorio sin cobertura, 2010. Fuente: Google Maps

Área urbana: Aquí se engloban las edificaciones de dimensiones diversas destinadas para el desarrollo de actividades humanas. Se incluyen los espacios habitacionales, industriales y de servicios (figura 5.24).



Figura 5.24. Asentamientos humanos en Colonia Valle Verde, 2012: Fuente: Google Maps

A medida que las ciudades crecen, cambios en la configuración de la cobertura se expresan en el territorio, actualmente dichas variaciones pueden ser detectados por medio del procesamiento digital de imágenes satelitales o aéreas en diferentes periodos.

Herramientas como los SIG nos permite asimilar la información espectral contenida en un pixel, valorarlos cuantitativamente en función de sus características como los es el color, la textura, la forma, entre otras, para su clasificación de acuerdo al criterio preestablecido por el usuario y de esta forma cuantificar sus propiedades e identificar ciertos patrones en el espacio.

Para la generación de los datos de la configuración de los usos de suelo correspondiente al año 2010, 2014 y 2018 se emplearon procedimientos automáticos para la clasificación de los cambios en conjunto con métodos tradicionales de interpretación visual.

La utilización de ambas metodologías se debe a las condiciones específicas inherentes del área de estudio y de los insumos empleados, los cuales se obtuvieron por medio de imágenes satelitales provenientes del software Google Earth para los años 2010,2014 y 2018.

5.3.2. Evolución de los cambios de usos de suelo, periodo 2010-2018

A medida que las ciudades crecen, cambios en la configuración de la cobertura se expresan en el territorio, actualmente dichas variaciones pueden ser detectados por medio del procesamiento digital de imágenes satelitales o aéreas en diferentes periodos.

Herramientas como los SIG nos permite asimilar la información espectral contenida en un pixel, valorarlos cuantitativamente en función de sus características como los es el color, la textura, la forma, entre otras, para su clasificación de acuerdo al criterio preestablecido por el usuario y de esta forma cuantificar sus propiedades e identificar ciertos patrones en el espacio.

Para la generación de los datos de la configuración de los usos de suelo correspondiente al año 2010, 2014 y 2018 se emplearon procedimientos automáticos para la clasificación de los cambios en conjunto con métodos tradicionales de interpretación visual.

La utilización de ambas metodologías se debe a las condiciones específicas inherentes del área de estudio y de los insumos empleados, los cuales se obtuvieron por medio de imágenes satelitales provenientes del software Google Earth. En este apartado se muestran las cifras correspondientes a cada uso de suelo para los años 2010,2014 y 2018.

El crecimiento urbano en el municipio no se expresa con la misma intensidad en el territorio, a su vez, la velocidad en el que se ha llevado a cabo los cambios de uso de suelo no ha sido constante ni territorialmente homogénea en el tiempo, por lo que en este apartado se expone la evolución de dichos cambios.

Para el año 2010, el territorio municipal estaba constituido mayoritariamente por las áreas cultivadas y gestionadas, el cual concentraba un aproximado de 63 por ciento (Tabla 5.22), por otro lado, la urbanización registró un valor de 6 por ciento (figura 5.25).

2010		
<i>Uso de suelo</i>	Área (km ²)	%
<i>Áreas cultivadas y gestionadas</i>	3.9	63.1
<i>Vegetación natural y semi-natural</i>	1.0	16.0
<i>Superficies artificiales y áreas asociadas</i>	0.9	14.6
<i>Área urbana</i>	0.4	6.2
<i>Total</i>	6.25	100

Tabla 5.22. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia.

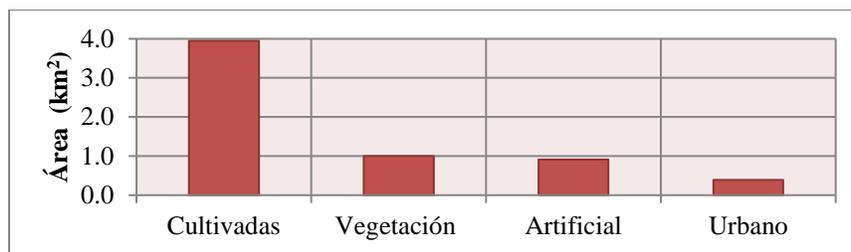


Figura 5.25. Área total de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia

Así mismo, entre los elementos que conforman el paisaje rural del municipio de Tonanitla, el área agrícola (áreas cultivadas) y el pastizal (vegetación natural) para tareas pecuarias, se contabilizó una participación del 79 por ciento (figura 5.26).

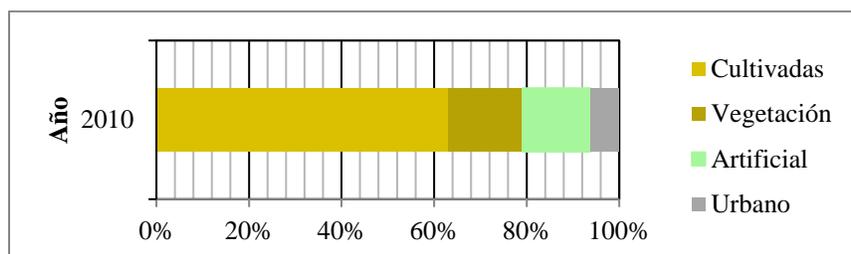
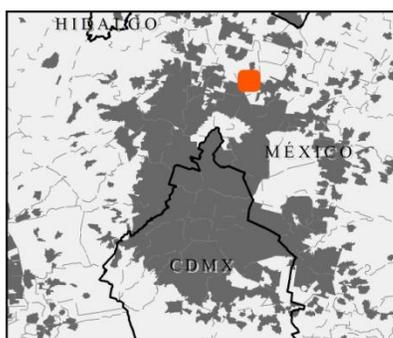


Figura 5.26. Participación porcentual de usos de suelo, 2010. Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.27, se muestra la representación espacial de los usos de suelo del área de estudio.



Usos de suelo

- Cultivadas
- Artificial
- Vegetación
- Urbano

Referencias Geográficas

- Límite del área de estudio
- Vialidad
- Límite municipal

Figura 5.27. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2010). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

En el año 2014, de igual forma el área cultivada fue el uso de suelo predominante en el territorio bajo estudio con un total de 3.5 km², sin embargo esto representa una reducción con respecto a lo obtenido en 2010 (tabla 5.23 y figura 5.28).

2014		
<i>Uso de suelo</i>	Área (km ²)	%
<i>Áreas cultivadas y gestionadas</i>	3.5	55.9
<i>Vegetación natural y semi-natural</i>	0.9	14.8
<i>Superficies artificiales y áreas asociadas</i>	1.4	22.1
<i>Área urbana</i>	0.4	7.2
<i>Total</i>	6.25	100

Tabla 5.23. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia.

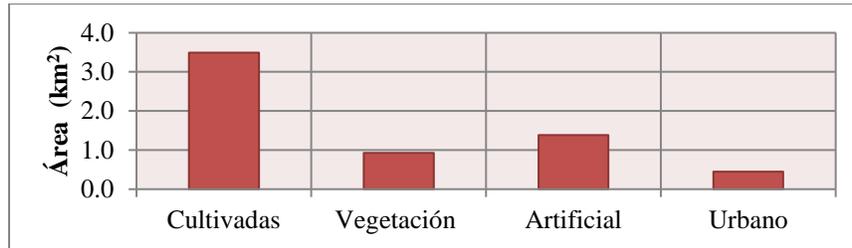


Figura 5.28. Área total de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia

Por su parte el área urbana y los usos de suelo asociados, como la superficie artificial obtuvieron un incremento, acumulando un total de 29 por ciento (figura 5.29)

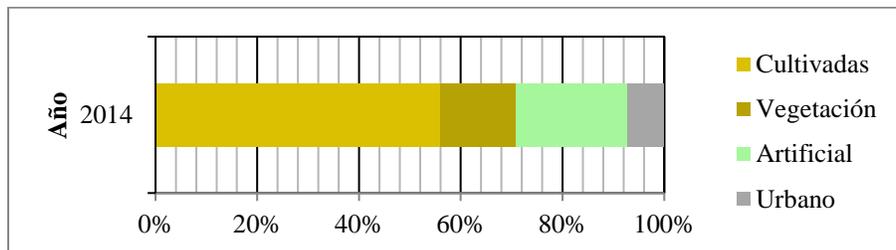
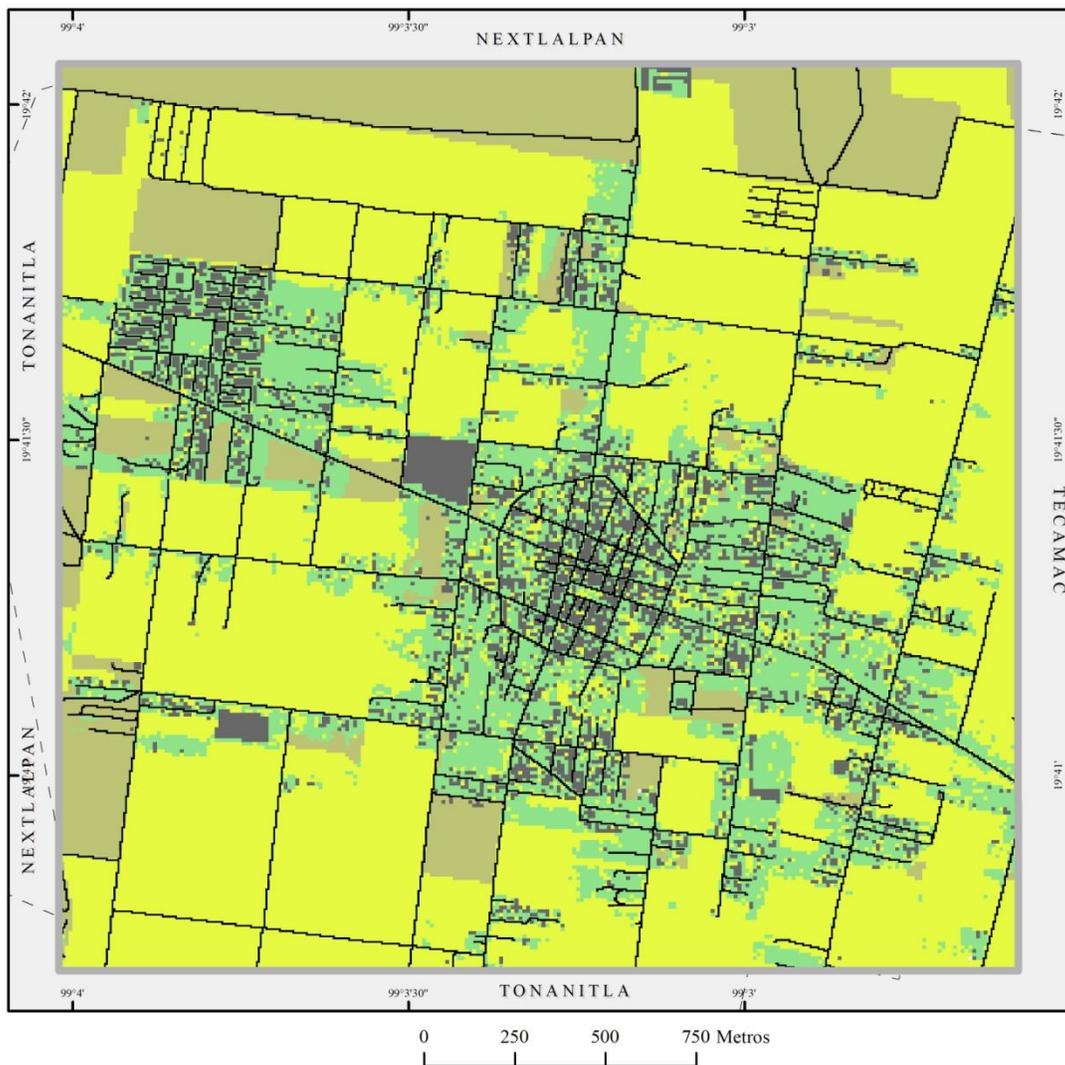


Figura 5.29. Participación porcentual de usos de suelo, 2014. Fuente: Elaboración propia

En la representación visual, se muestra la pérdida de homogeneidad del área agrícola ubicada en la periferia de Santa María Tonanitla, ya que la disposición espacial se caracteriza por la intensificación del área artificial (figura 5.30).



Usos de suelo

- Cultivadas
- Artificial
- Vegetación
- Urbano

Referencias Geográficas

- Límite del área de estudio
- Vialidad
- Límite municipal

Figura 5.30. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2014). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

La configuración de los usos de suelo en el año 2018 se caracteriza por el aumento de la proporción de las áreas sin cobertura tras la consolidación de las superficies artificiales como el segundo con mayor extensión en el territorio (Tabla 5.24 y Figura 5.31).

2018		
<i>Uso de suelo</i>	Área (km ²)	%
<i>Áreas cultivadas y gestionadas</i>	3.3	52.3
<i>Vegetación natural y semi-natural</i>	0.8	12.3
<i>Superficies artificiales y áreas asociadas</i>	1.7	27.0
<i>Área urbana</i>	0.5	8.4
<i>Total</i>	6.25	100

Tabla 5.24. Área total y participación porcentual de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia.

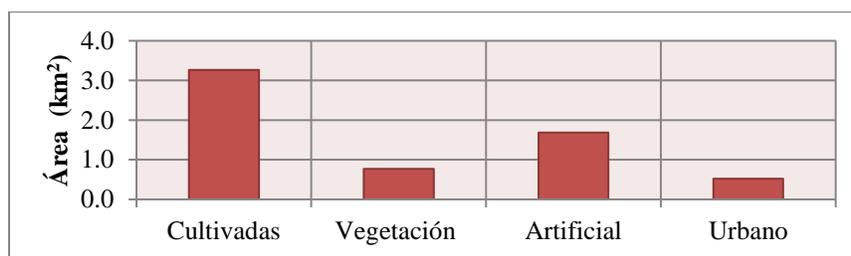


Figura 5.31. Área total de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia

De igual forma, en el periodo 2014 a 2018 continuó la tendencia de reducción del espacio destinado para las actividades agropecuarias, puesto que el 64 por ciento del área de estudio se concentró en los usos agrícolas (cultivados) y de pastizal (vegetación) (Figura 5.32).

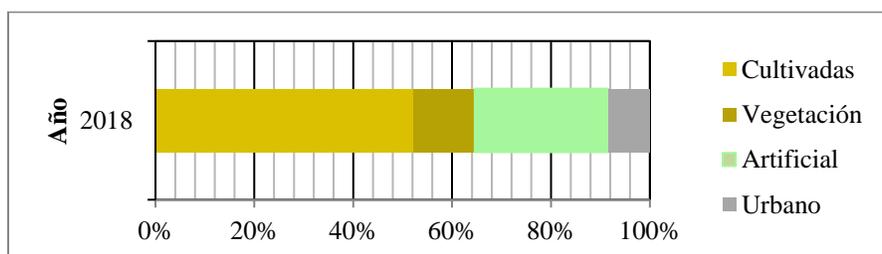
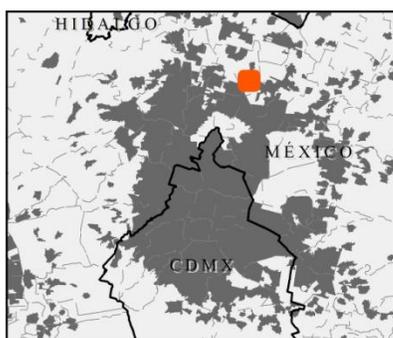


Figura 5.32. Participación porcentual de usos de suelo, 2018. Fuente: Elaboración propia

Administrativamente, estos cambios se traducen en la conversión de predios rústicos a territorios con cobertura artificial los cuales estarán vinculados con el emplazamiento de áreas habitacionales a largo plazo (figura 5.33).



Usos de suelo

- Cultivadas
- Artificial
- Vegetación
- Urbano

Referencias Geográficas

- Límite del área de estudio
- Vialidad
- Límite municipal

Figura 5.33. Clasificación de los usos de suelo, Tonanitla (2018). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Con la intención de sintetizar la información obtenida de las clasificaciones, en la tabla 5.25 se expone la recopilación de la evolución de los usos y del crecimiento del área urbana en el Tonanitla desde el año 2010 al 2018.

Conforme a la tabla 5.25, se obtiene que los predios clasificados como áreas cultivadas redujeron la proporción en un 10.8 por ciento en un lapso de 8 años, siendo de esta forma el uso que presentó una mayor reducción en el periodo estudiado.

Por otro lado, la cobertura artificial fue el que registró un aumento superior en términos porcentuales, ya que, obtuvo un incremento de 12.4 por ciento en relación con lo obtenido en el año 2010

Uso de suelo	2010		2014		2018		Balance	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	2010-2014	2014-2018
<i>Agrícola</i>	3.9	63.1	3.5	55.9	3.3	52.3	-7.2	-3.6
<i>Pastizal</i>	1.0	16.0	0.9	14.8	0.8	12.3	-1.2	-2.5
<i>Sin Cobertura</i>	0.9	14.6	1.4	22.1	1.7	27.0	7.5	4.9
<i>Urbano</i>	0.4	6.2	0.4	7.2	0.5	8.4	0.9	1.2

Tabla 5.4. Área total, participación y balance porcentual de usos de suelo, 2010- 2018. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las tendencias, en la figura 5.34 se representa la dinámica para cada uno de los usos de suelo. Se obtuvo que la configuración territorial dista de ser estática, sin embargo, el gráfico permite inferir características generales del comportamiento.

En primera instancia, el ritmo del crecimiento urbano es lento, no obstante, el aumento ha sido constante a lo largo del periodo analizado. En segundo lugar, los usos relacionados a las prácticas agrícolas, al cuidado y la explotación de animales domesticables han presentado un decrecimiento en cada uno de los tres periodos analizados.

El suelo correspondiente a los terrenos de cultivos, sobresale por la proporción de área perdida y la velocidad en la que se produce dichas variaciones, en cambio, el ritmo de decrecimiento el pastizal (vegetación natural y semi natural) ha permanecido constante.

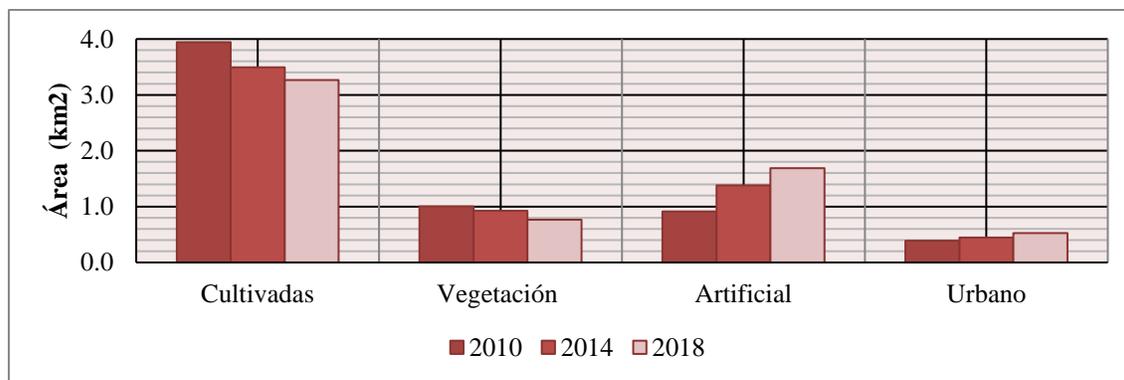


Figura 5.34. Área total de usos de suelo, 2010-2018. Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.35 se muestra la proporción porcentual de los cuatro usos de suelo bajo estudio, del cual deriva que el sector agropecuario del área de estudio ha reducido su proporción en un 10.8 por ciento, en una razón de 1.3 por ciento anual.

Dicha proporción se distribuye en el resto de usos, siendo el de tipo artificial el de mayor proliferación. Este territorio, se caracteriza por la pérdida de vocación de las actividades primarias, sustituyéndolas principalmente para futuros espacios habitacionales.

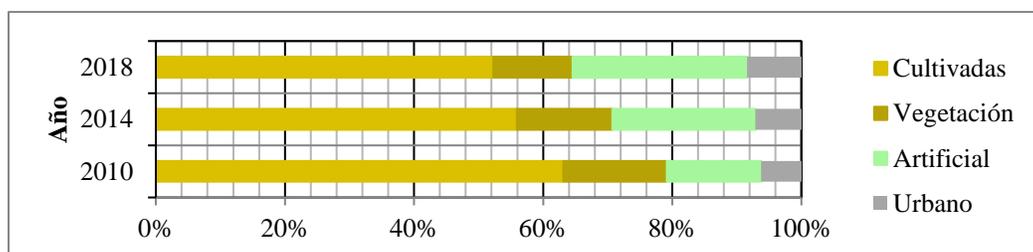


Figura 5.35. Participación porcentual de usos de suelo, 2010- 2018. Fuente: Elaboración propia

En el área de estudio se presentaron procesos de cambio de usos de suelo en un ritmo acelerado y la elaboración de los mapas de uso de suelo fungió como un elemento primordial para la cuantificación de dichos cambios y la visualización de las alteraciones en el territorio.

Mientras tanto, la importancia de la generación de mapas temáticos yace en la identificación y descripción de una o más variables. En esta tesis corresponde a la evolución y el patrón del crecimiento urbano sobre el territorio municipal.

Con la información obtenida en las clasificaciones de uso de suelo, se procedió a representar los datos referentes al área ocupada por los espacios habitacionales y representarlos a través de la sobreposición en diversas series de tiempo.

En la figura 5.36, se reproduce el trazo del área urbana en el periodo 2010 y en el 2018, al comparar la disposición geográfica en ambas temporalidades obteniendo que el patrón de ocupación es heterogéneo debido a la densidad de ocupación del territorio.

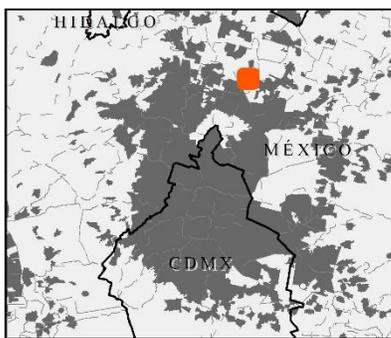
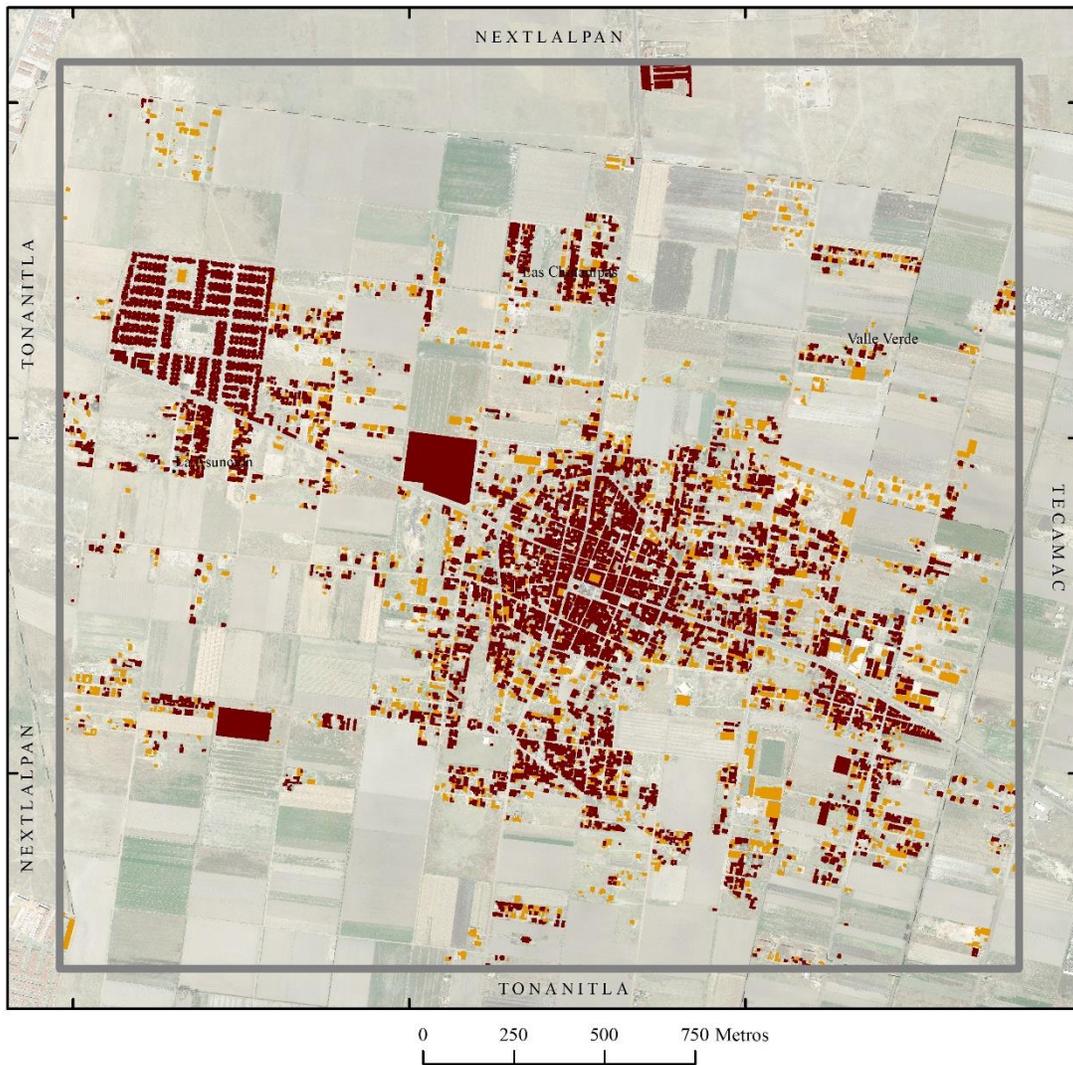
En primer lugar, el área urbana del año 2010 presentaba un mayor grado de homogeneidad, puesto que los asentamientos se aglomeraban principalmente en las proximidades de la cabecera municipal y en la Colonia la Asunción. Sin embargo, se registra la presencia de viviendas ubicadas en áreas alejadas a las localidades centrales sin generar un continuo espacial.

En segundo lugar, el uso urbano en 2018 se caracteriza por una mayor dispersión, ya que los sitios de emplazamiento no se restringen a la periferia de la cabecera municipal, sino que se ubican en áreas remotas sin una continuidad espacial por lo que estas condiciones impiden que exista la conurbación entre localidades.

Además, este proceso de ocupación del territorio se caracteriza por la baja densidad, lo cual corresponde a las cifras obtenidas en los apartados anteriores, en los que se obtuvo que la urbanización del área de estudio no se produce en forma intensiva y por ende tras el análisis de cambio y series de tiempo se obtiene que el uso urbano se presenta del subtipo expansivo.

En relación con el modelo de White basado en Autómatas Celulares usado en esta investigación, una de sus características principales es la de requerir como insumo primario mapas de uso de suelo en un periodo inicial como punto de partida para simular la dinámica urbana, para realizar esto se emplearon los datos provenientes del procesamiento de las imágenes aéreas en el formato apropiado para el software.

Por lo que en el siguiente apartado se examinan las características del modelo contextualizado en el territorio bajo estudio, su funcionamiento, la calibración y finalmente se muestran los resultados y las evaluaciones de la precisión de los productos obtenidos.



Usos de suelo

- Uso urbano 2010
- Uso urbano 2018

Referencias Geográficas

- Límite del área de estudio
- Límite municipal

Figura 5.36 Evolución del crecimiento urbano (2010-2018). Fuente: Elaboración propia.

5.4. Modelado

Una vez examinado tanto las causas que originan la urbanización y el patrón de crecimiento urbano en Tonanitla, se procede a definir las propiedades del área de estudio de acuerdo con las características del modelo de cambios de usos de suelo de Roger White.

Además, se describe el proceso de calibración del modelo en función de la dinámica de la zona de estudio y las evaluaciones que se emplearon para determinar el grado de similitud entre los usos de suelo simulados y reales para los periodos 2014-2026.

5.4.1. Características del modelo

El espacio celular definido para el proceso de modelado comprendió el lugar de estudio del municipio de Tonanitla, el cual comprende la localidad de Santa María Tonanitla, La Asunción, La Chinampa y Valle Verde. En cuanto a las condiciones de frontera de los autómatas celulares, en el espacio celular se incluyó un área la cual sobrepasa los límites políticos de la superficie municipal con el objetivo de representar la dinámica en Tonanitla.

El espacio celular está limitado por las coordenadas $19^{\circ} 42' 3''N$, $-99^{\circ} 4' 1''W$ y $19^{\circ} 40' 42''N$, $-99^{\circ} 2' 35''W$, formando un polígono cuadrado con dimensiones de 2500 metros por lado. Con la finalidad de representar de forma óptima el trazo urbano y la amplitud de las vías terrestres de comunicación, se utilizó un tamaño de celda de 10 por 10 metros, por lo tanto, la malla está compuesta por un total de 62,500 células, las cuales contienen la información de los usos de suelo.

En el apartado 5.3 se detallan las características de cuatro estados dinámicos usados: a)áreas cultivadas, b)vegetación natural y semi natural, c)superficies artificiales y d)el área urbana. En relación con los estados fijos, se considera únicamente a las vías de comunicación terrestre como factor determinante para la ubicación de las actividades humanas dentro del área bajo estudio.

La función de transición usada para llevar a cabo el modelado fue la desarrollada por el investigador Roger White basándose en el funcionamiento y aprovechando las propiedades de los autómatas celulares, en la que para el cálculo del potencial del cambio de cada uno de los usos de suelo bajo análisis, se calcula una serie de potenciales de transición en cada celda activa.

En lo que se refiere al tipo de vecindad, se aplica la de tipo Von Neumann con un radio de 3 celdas a partir de la célula central, estos parámetros se aplicaron ya que se observó una mejor calidad en las simulaciones obtenidas.

5.4.2. Calibración del modelo

Las tareas de calibración de acuerdo con la RAE (2018) consisten en un conjunto de operaciones que tienen como finalidad establecer relaciones entre los valores indicados por una medida material o instrumento y los valores correspondientes a un objeto de referencia.

Con respecto a este trabajo, tanto el mapa de distribución espacial de los usos de suelo como de sus atributos de 2018 fungieron como el objeto de referencia. Por su parte, los valores indicados serán aquellos elementos evaluados en la ecuación de White.

Entre los aspectos a evaluar se incluyeron la accesibilidad, los pesos de los usos de suelo, la inercia, los potenciales de transición, la perturbación estocástica, la vecindad y el radio de la vecindad de la celda analizada. Los valores fueron probados a través del entorno de desarrollo del software libre NetLogo (ver Anexo 1), plataforma en la que se programaron las cualidades del modelo y se generaron las simulaciones.

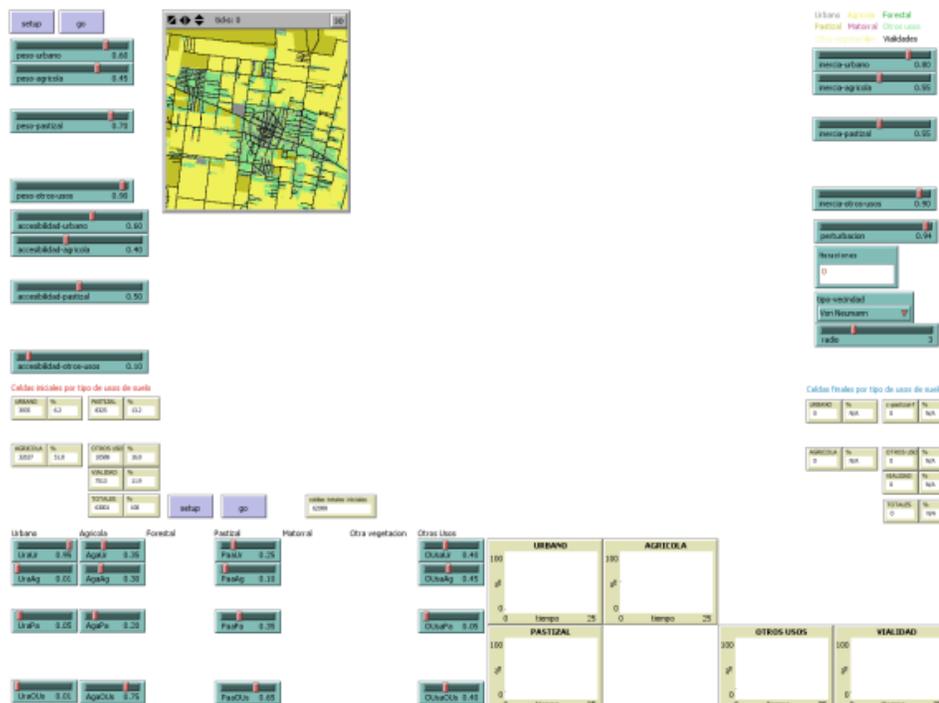


Figura 5.37 Interfaz de software NetLogo 3.1. Fuente: Elaboración propia.

El software presenta un gran listado de funciones, entre las que destaca la posibilidad de integrar información geográfica, generando de esta forma modelos con información real (estadística y visual) georreferenciada.

Otra ventaja que posee NetLogo, es la capacidad de soportar el código basado la ecuación de White para la simulación de sistemas complejos por medio de autómatas celulares, obtenido de esta forma el comportamiento de los usos de suelo y su representación visual.

En la siguiente sección del texto se hace un desglose con las variables definidas en el modelo con los valores respectivos que se emplearon para generar la transición entre los estados.

Accesibilidad

La accesibilidad se calcula en términos de cercanía con las vías terrestres de transporte, en el modelo se considera este factor independientemente de los tipos de vía existentes. Los usos de suelo que requieran mayor presencia de caminos para la realización de las actividades tendrán valores cercanos a 1.

Para el área de estudio se determinó que la facilidad de acceso a las vías se encuentra relacionada principalmente con el uso de suelo urbano, por lo que áreas próximas a infraestructura de transporte son más propensas a ser empleadas para comercios, viviendas, entre otros.

El valor que se asignó fue de .60, siendo el de mayor envergadura entre los usos bajo estudio, sin embargo, no se aproxima al valor máximo debido a que se detectaron edificaciones sin vialidades cercanas.

Por su parte, las áreas terrestres cultivadas y la vegetación se fijaron en .40 y .50 respectivamente, debido a que en ellas se realizan principalmente actividades agrícolas y de pastoreo por lo que las vías son empleadas para la delimitación y acceso a los predios.

Finalmente, el valor designado para las superficies artificiales y áreas asociadas fue de .10, esto se obtuvo a partir de una serie de pruebas de calibración del modelo. Cabe destacar que la degradación vegetación y de las áreas agrícolas no se presenta en un patrón lineal.

<i>Uso de suelo</i>	<i>Accesibilidad</i>
<i>Cultivadas</i>	.10
<i>Vegetación</i>	.50
<i>Artificial</i>	.40
<i>Urbano</i>	.60

Tabla 5.26 Valoración de la accesibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Pesos de los usos de suelo

La propiedad de peso está relacionada directamente con la vecindad intrínseca de los distintos usos de suelo, estas conveniencias definen si un uso de suelo localizado en un punto específico se transforme en otro o permanezca sin cambio.

Siendo valoraciones cercanas a 1 cuando exista una mayor influencia o atracción con los usos vecinos, 0 cuando esta condición resulte ser nula y -1 cuando exista un predominio menor o de repulsión.

En relación a la cobertura artificial, se evaluó como uso de suelo con mayor influencia en el área de estudio con .90, ya que existe una tendencia creciente al aumento de áreas sin vocación permanente de actividades agrícolas y pecuarias.

En segunda instancia con un valor de .70 destaca la vegetación natural y semi natural, esto se debe a la persistencia del pastizal a pesar de ubicarse generalmente en las cercanías del uso urbano y sus áreas artificiales asociadas, los cuales son los usos con mayor crecimiento en el área de estudio.

Para los espacios clasificados como urbanos se determinó un valor de .60 debido a que la presencia de este uso se da de forma dispersa y por ende de menor intensidad en el territorio. Finalmente, a las áreas cultivadas se le otorgó .45 de forma empírica tras varias pruebas de calibración.

<i>Uso de suelo</i>	<i>Peso de uso de suelo</i>
<i>Cultivadas</i>	.45
<i>Vegetación</i>	.70
<i>Artificial</i>	.90
<i>Urbano</i>	.60

Tabla 5.27 Valoración de los pesos de los usos de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Inercia

La inercia se refiere al efecto o la presión que ejerce un uso de suelo aledaño a una celda bajo análisis, dado que algunos usos de suelo se atraen o repelen entre ellos. Es decir, si el valor es inmediato a 1 la probabilidad de que una celda permanezca en su estado actual es mayor.

A las áreas artificiales y asociadas se le asignó un valor de .90 a causa de las observaciones realizadas en los mapas de uso de suelo en el periodo bajo estudio, puesto que de forma general no tiende a cambiar su estado a excepción de su transformación hacia espacios urbanos.

Con respecto al territorio clasificado como urbano se optó por un valor de .80 debido a la poca probabilidad de que una edificación se torne hacia el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias.

Los valores inferiores se asociaron principalmente en el caso de las áreas cultivadas y con vegetación, ya que, tanto visual como estadísticamente se trata de los usos con mayor pérdida de extensión sobre el territorio analizado.

<i>Uso de suelo</i>	<i>Inercia</i>
<i>Cultivadas</i>	.55
<i>Vegetación</i>	.55
<i>Artificial</i>	.90
<i>Urbano</i>	.80

Tabla 5.28 Valoración del factor de inercia. Fuente: Elaboración propia.

Potencial de transición

La función del cálculo de los potenciales de transición es vital para determinar los cambios de cada celda activa al estado para el cual tiene el potencial más elevado. En esta sección se delimita las posibles compatibilidades entre un determinado uso de suelo y el efecto global de los diferentes usos dentro de su vecindad.

Puede tomar valores entre el rango de 0 a 1, siendo de mayor denominación las relaciones con mayor tendencia a transformar su estado. En la tabla 5.29, se muestra una matriz con los potenciales de transición, los cuales se obtuvieron durante las diferentes pruebas de

calibración del modelo. De esta forma, como herramienta estadística se puede visualizar de manera sintetizada la probabilidad de una transición de un estado (columna) a otro estado (filas).

	Urbano	Cultivadas	Vegetación	Artificial
<i>Urbano</i>	.95	.35	.25	.40
<i>Cultivadas</i>	.01	.30	.10	.45
<i>Vegetación</i>	.05	.20	.35	.05
<i>Artificial</i>	.01	.75	.65	.40

Tabla 5.29 Matriz de potencial de transición. Fuente: Elaboración propia.

Sirva de ejemplo la primera fila correspondiente a urbano. Existe .95 de probabilidad de que las áreas urbanas prevalezcan en el mismo estado; después, .35 de que las áreas cultivadas se tornen hacia territorios urbanos; .25 de la transición de zonas con vegetación natural y semi natural se conviertan en espacios urbanos y finalmente un .40 de que una superficie artificial se transforme en una urbana.

Perturbación estocástica

Cuando un sistema evoluciona o cambia de un estado a otro a lo largo del tiempo y que puede caracterizarse por estar en cualquiera de un conjunto de estados previamente especificado, por la forma en la que el sistema evoluciona no sería determinista al estar influenciado por algún mecanismo azaroso.

Esta forma de representar la evolución aleatoria de un sistema a lo largo del tiempo forma parte de los procesos estocásticos, por lo que el estudio de las variables aleatorias que conforman el proceso no serían independientes entre sí, sino que deben de estar relacionadas unas con otras de alguna manera particular.

La perturbación estocástica en este modelo posibilita la captura del efecto del conocimiento imperfecto del sistema, de las necesidades y de las variaciones entre los actores con efectos directos sobre las decisiones sobre los usos de suelo.

Este parámetro se fijó en .94, debido a que a un mayor grado de aleatoriedad en las ubicaciones de uso de suelo urbano y de las áreas de artificiales, lo que representa un alto grado de desconocimiento del estado del sistema por parte de los actores.

Tipo de vecindad y radio

El modelo se programó para evaluar las condiciones en función de la configuración de vecindad de Moore y Von Neumann, adicionalmente se puede experimentar con el tamaño de vecindad desde 0 a 10 celdas en relación a la célula de análisis.

Como parte del conocimiento adquirido durante las distintas pruebas de calibración del modelo se determinó que la vecindad de Neumann con un radio de 3 celdas fueron las características de mayor adecuación para la obtención de resultados convenientes.

5.4.3. Simulación

Primeramente, para el presente estudio se llevaron a cabo una serie de pasos para la adecuación del área de estudio en relación con las características iniciales del modelo y viceversa.

Entre las actividades destaca la asignación de los atributos a los archivos procedentes de los sistemas de información geográfica, después, se procedió a ajustar el área de visualización del polígono bajo estudio.

Además, se adaptó el número cálculos de potencial de cambio de uso de suelo por corrida a ejecutar, finalmente se realizaron los ajustes en los parámetros de la función de transición como parte de la calibración.

El código fue programado para realizar un total 62,500 cálculos por cada simulación generada, el modelo se fijó en un máximo de 50 simulaciones distribuidas igualmente en 5 corridas. Los escenarios de cambios de uso de suelo generados del área de estudio tuvieron como configuración espacial base el mapa correspondiente al año 2014, siendo la distribución de usos de suelo de 2018 el mapa de referencia del escenario futuro.

Cabe señalar que pese a que cada simulación no representa una temporalidad establecida, al compararla con la imagen real se puede establecer en primera instancia el grado de similitud cualitativa.

En relación con la configuración real del año 2018, la cuarta simulación resaltó por presentar una mayor afinidad, por lo tanto para la generación de los escenarios del polígono estudiado para los años 2022 y 2026 se efectuaron un total de 12 simulaciones.

En la figura 5.38 se expone los mapas de escenario base y el usado en las tareas de calibración para la generación de las simulaciones, es decir los correspondientes a los años 2014 (figura 5.38.a) y 2018 (figura 5.38.b) respectivamente. Además, en color rojo se demarcaron las zonas con mayor dinamismo en la temporalidad analizada.

Posteriormente, en la imagen 5.38.c se muestra el primer escenario simulado, el cual representa las condiciones de la zona de estudio en el año 2018, en esta imagen se observa una ligera densificación en el área central no obstante en las áreas periféricas ubicadas en el norte se muestra la proliferación de asentamientos y la sustitución de áreas agrícolas y pecuarias por coberturas artificiales y habitacionales.

Adicionalmente se integran las simulaciones 8 y 12 a partir las cuales resultan de los atributos empleados para la simulación del 2018 y que corresponden a los escenarios futuros en los años 2022 y 2026 respectivamente (figura 5.38.d) y 2026 (figura 5.38.e).

En la tabla 5.30 se expone los estadísticos correspondientes al porcentaje de territorio por uso de suelo en el periodo histórico de 2010 a 2018 observados, adicionalmente se incluye la información obtenida en las simulaciones de ciclo simulado de 2018 a 2026.

Año	Urbano	Urbano (S)	Vegetación	Vegetación (S)	Cultivadas	Cultivadas (S)	Artificial	Artificial (S)
2010	5.4		14.2		57.6		10.9	
2014	6.2		13.2		51.8		16.8	
2018	7.5	7.6	11.0	12.2	48.6	46.0	21.0	23.1
2022		7.9		11.5		41.0		28.6
2026		8.1		10.8		35.9		34.2

Tabla 5.30 Porcentaje de área total ocupada por uso de suelo real (2010- 2018) y simulado (2018-2026) Fuente: Elaboración propia.

En resumen, las simulaciones se pueden emplear como una herramienta auxiliar para actividades relacionadas a la planeación, ya que, se puede obtener resultados estadísticos y visuales a corto y mediano plazo.

No obstante al tratarse de procesos complejos, de naturaleza social se debe especificar el grado de confiabilidad de los resultados expuestos, por lo que el siguiente apartado corresponde a las pruebas de evaluación a las que fueron sometidos los escenarios propuestos.

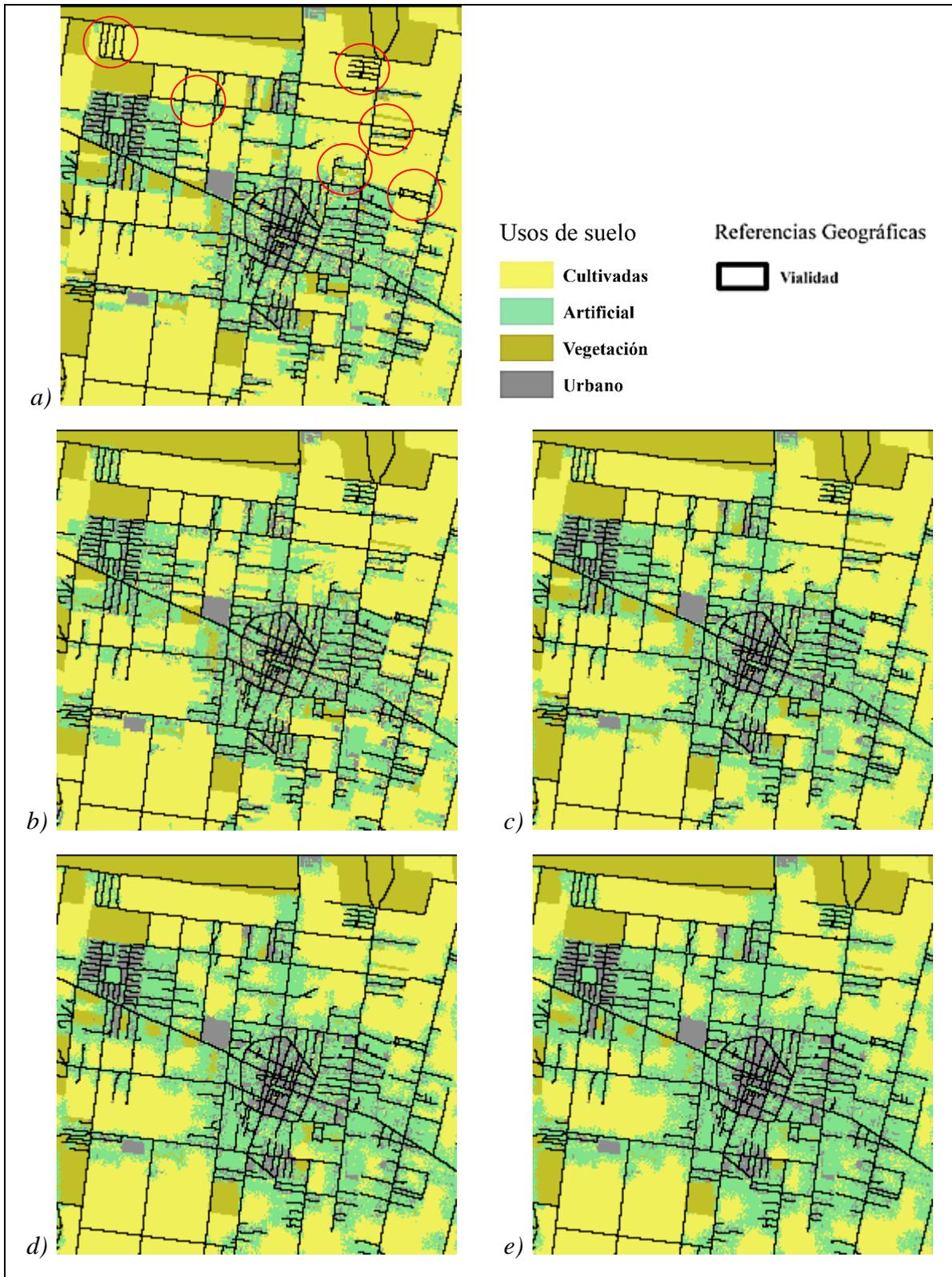


Figura 5.38. Simulación de Tonanitla: a) Escenario 2014 real; b) Escenario 2018 real; c) Simulación 4 (2018); d) Simulación 8 (2022); Simulación 12 (2026). Fuente: Elaboración propia.

5.4.4. Evaluación

La calibración del modelo concluye cuando los parámetros estadísticos y las evaluaciones visuales muestran un alto grado de coincidencia entre los datos simulados y los reales. En éste apartado se presentan los resultados de las distintas evaluaciones las cuales se aplicaron a las simulaciones obtenidas con el software Netlogo.

Para estimar el grado de similitud de la simulación con la imagen real de 2018, se emplearon las siguientes pruebas de validación:

- Comparación visual de la disposición de los usos (validación cualitativa)
- Comparativa de los atributos estadísticos por cada uso (validación cuantitativa)
- Evaluación de la precisión de los atributos espaciales (validación cuantitativa)

Comparación visual

Acorde con la imagen 5.39.a y 5.39.b se puede evaluar visualmente la similitud entre los datos reales de 2018 y los generados a partir del primer escenario simulado con base a la configuración espacial del año 2014.

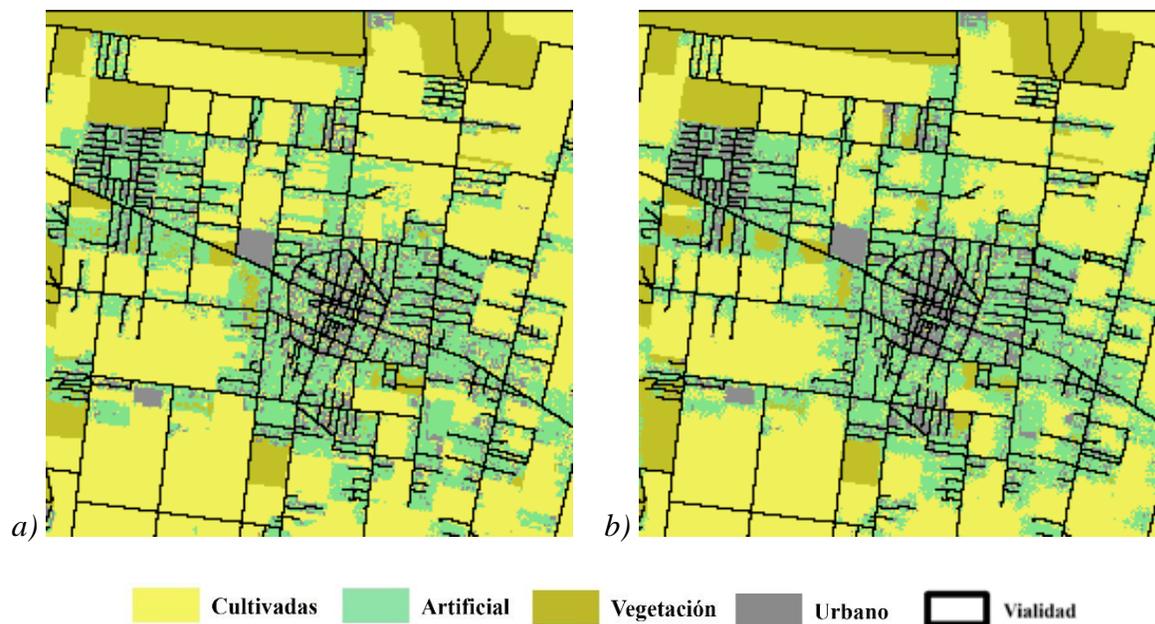


Figura 5.39. Comparativa visual de simulación de Tonanitla: a) Escenario 2018 real; b) Escenario 2018 simulado.
Fuente: Elaboración propia.

Estos dos escenarios reflejan una alta similitud, principalmente en la zona central del modelo, es evidente que existan discrepancias sin embargo estas se deben en gran medida a las características aleatorias del modelo, además de que en cada iteración se calcula el potencial de forma sincrónica, es decir, todas las celdas se actualizan al mismo tiempo.

No obstante pese a esa limitación se logró obtener un patrón de crecimiento acelerado para el uso de suelo artificial en el territorio, principalmente en la porción norte de la imagen, sitio el cual presentó un gran dinamismo durante el periodo analizado.

Así mismo, se consiguió recrear el aumento del área urbana en un ritmo no intensivo y de forma heterogénea sobre el territorio, esto último debido a la modificación en los parámetros referentes al factor estocástico.

Por el contrario, la vegetación natural y semi natural fue el uso con un mayor grado de incompatibilidad, debido al efecto del cálculo sincronizado de las células, siendo las áreas próximas a la cabecera municipal y la Colonia la Asunción las que presentan una mayor tendencia a modificar su estado, caso contrario con los territorios relativamente alejados.

Comparación tendencial

En relación con la validación cuantitativa de los atributos del escenario, en la tabla 5.31 se concentra la información acerca del porcentaje de área ocupada por cada uso de suelo de la imagen real de 2018 y la simulación del mismo año.

<i>Uso</i>	Porcentaje de área		
	Real	Simulado	Diferencia
<i>Urbano</i>	7.5	7.6	0.2
<i>Vegetación</i>	11.0	12.2	1.3
<i>Cultivadas</i>	48.6	46.0	-2.6
<i>Artificial</i>	21.0	23.1	2.1

Tabla 5.31 Comparativa de datos reales y simulados (2018). Fuente: Elaboración propia.

Siendo el uso urbano simulado es el que presentó una menor diferencia porcentual en relación con el dato de referencia, ya que existe una variación de 0.2 con una tendencia a aumentar el número.

Por el contrario, el uso con una mayor divergencia en la relación de atributos reales y simulados fue el de las áreas cultivadas con una diferencia de 2.6 por ciento, no obstante de forma global, los valores de los escenarios de 2022 y 2026 prolonga la tendencia a la reducción de la frontera agrícola en un ritmo constante.

Por otra parte, en el gráfico 5.40 se visualiza las tendencias de los cambios entre los datos reales y los datos simulados, de donde se infiere que existe un alto grado de similitud en el porcentaje de área ocupada.

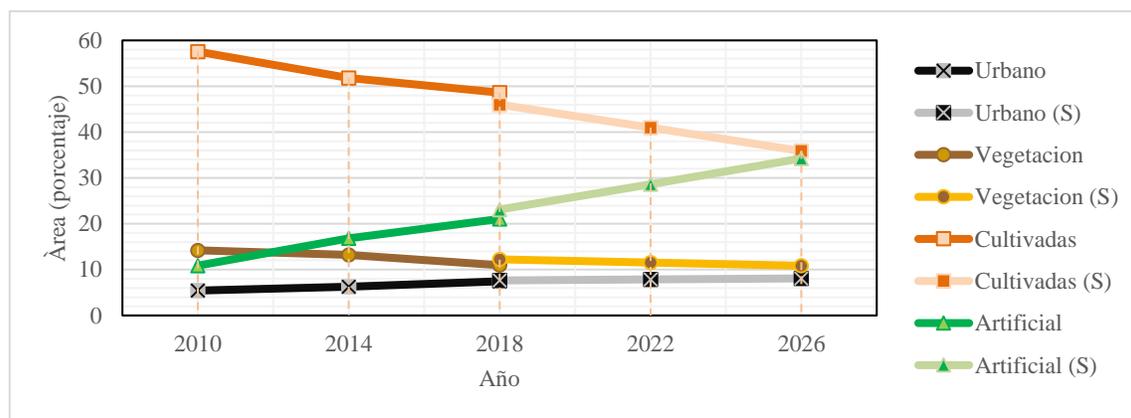


Figura 5.40. Tendencia de cambios de uso de suelo reales y simulados (2010-2026). Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de la precisión

La evaluación de la precisión de la ubicación es una actividad frecuente en tareas de clasificación de imágenes supervisadas, por medio de esta prueba se compara la imagen clasificada con otra fuente de datos considerada como exacta (ESRI, 2019), para este estudio se cotejó la imagen obtenida en Netlogo con la real de 2018.

En primer lugar, se creó un conjunto de puntos aleatorios con el objetivo de obtener información de los atributos, después, se comparó con los datos correspondientes a la simulación (figura 5.41).

El muestreo se convierte en el medio por el cual se puede estimar la precisión del mapa simulado al compararlo con los datos de referencia correspondientes al mapa de usos de suelo generado. Con el objetivo de producir resultados eficientes se eligió el muestreo aleatorio simple con un tamaño de muestra de 50 puntos por clase.

Se seleccionó ese esquema de muestreo y ese tamaño a partir de los comparativos realizados por Hashemian (2004), de los que se obtuvo que este tipo era el apropiado para la estimación de errores en imágenes con campos pequeños con una mayor distribución y dispersión de clases.

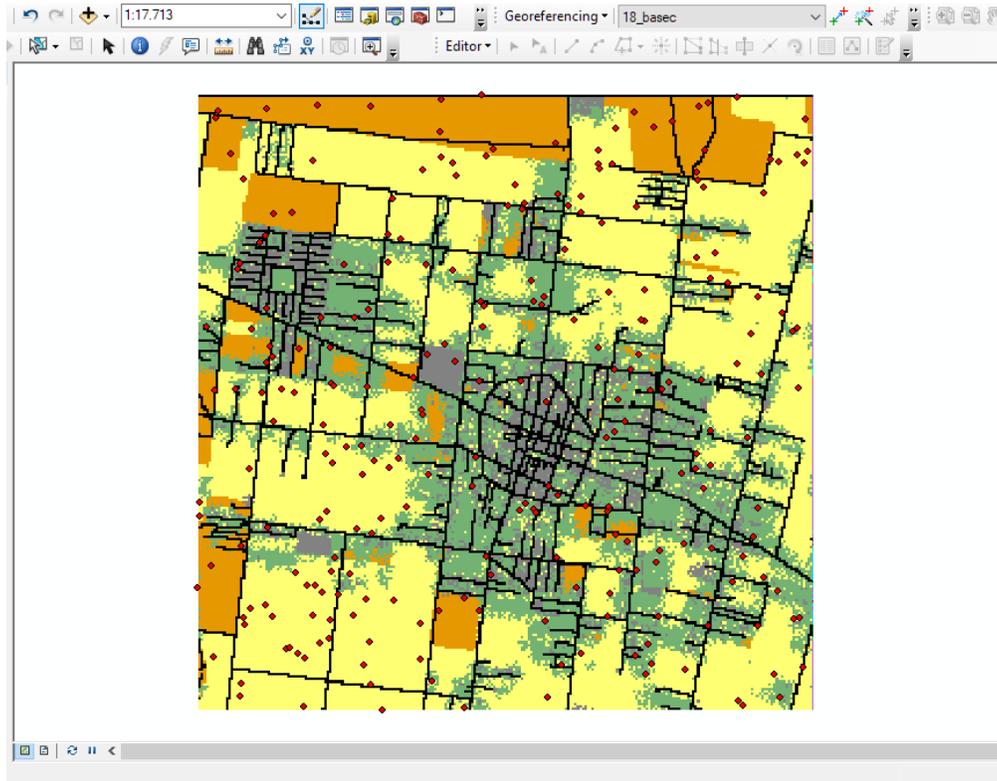


Figura 5.41 Generación de puntos aleatorios sobre escenario real 2018. Fuente: Elaboración propia.

La relación de los valores extraídos de los dos conjuntos de información se concentra en dos formas. La primera de ellas es la matriz de error, en la que se describe la comparación de las dos fuentes de información y segundo, mediante el coeficiente Kappa que consiste en una medida de concordancia entre filas y columnas de la matriz de error.

En relación con la matriz de error, la precisión de la clasificación de la imagen se informa con mayor frecuencia como porcentaje, es decir, la proporción de píxeles correctamente clasificados de acuerdo al número total de píxeles asignados a una categoría particular verificada.

Por otro lado, del coeficiente Kappa resulta el grado de concordancia real entre los datos presentados menos la concordancia aleatoria, es una medida de precisión utilizada para

determinar si los resultados en la matriz de error son significativamente mejores que un resultado aleatorio (Congalton, 2005).

En la tabla 5.32 se despliega la información de la matriz de error respectiva a la comparación del año 2018 con la simulación bajo análisis. En esta se incluye la frecuencia de pixeles clasificados en cada uso de suelo. Cabe mencionar en esta tabla se incluye las vías de comunicación terrestre, que pese a ser un estado estático es un elemento representado en ambas imágenes.

	Cultivadas	Vegetación	Urbano	Artificial	Vías	Porcentaje
<i>Cultivadas</i>	107	0	0	9	0	94.24%
<i>Vegetación</i>	3	27	1	2	0	81.82%
<i>Urbano</i>	1	0	16	1	0	88.89%
<i>Artificial</i>	7	4	4	39	0	72.22%
<i>Vías</i>	0	0	0	0	30	100%
<i>Porcentaje</i>	90.68%	87.10%	76.19%	76.47%	100%	87.20%

Tabla 5.32 Evaluación de la precisión con la matriz de error (2018). Fuente: Elaboración propia.

La tabla se construyó a partir de una malla de 250 puntos ubicados en forma aleatoria, siendo las áreas cultivadas el uso activo con mayor número de aciertos. Por su parte la mayor disparidad se presenta en el estado correspondiente al uso artificial, con una precisión inferior al 76 por ciento pero mayor a 72.

En relación con la proporción de acuerdos observados en ambas imágenes, se obtuvo que existe un 87 por ciento de coincidencia, por tanto, 218 de 250 muestras presentaron valores constantes, al presentar un dato positivo y próximo al máximo acuerdo, se infiere que el escenario simulado representa un alto porcentaje de similitud.

Con respecto al coeficiente Kappa, el presente estudio demuestra poseer un excelente grado de concordancia en cuanto a lo no esperado por azar entre los datos observados y esperados, por lo que el resultado indicaría un grado significativamente alto de consistencia entre ambos mapas.

Kappa
0.818140486

Si bien los resultados expuestos representan una valoración de elevada confiabilidad se debe considerar que se incluyó para su cálculo el rubro de las vías de comunicación las cuales obtuvieron una efectividad que puede generar un sesgo en la información representada.

En la tabla 5.33, se presenta el conteo de la frecuencia de la matriz de error con los registros de los estados activos representados en el mapa sin incluir a los usos fijos, en la temporalidad 2018.

	Cultivadas	Vegetación	Urbano	Artificial	Porcentaje
<i>Cultivadas</i>	107	0	0	9	92.24%
<i>Vegetación</i>	3	27	1	2	81.82%
<i>Urbano</i>	1	0	16	1	88.89%
<i>Artificial</i>	7	4	4	39	72.22%
<i>Porcentaje</i>	90.68%	87.10%	76.19%	76.47%	85.52%

Tabla 5.33 Evaluación de la precisión con la matriz de error sin vías de comunicación (2018). Fuente: Elaboración propia.

La tabla se compone de los atributos extraídos por el subtotal de 221 puntos ubicados al azar en la extensión del área de estudio. De igual forma, se obtuvo un patrón similar a lo obtenido con la inclusión de los datos de las vías de comunicación.

Ya que en un rango de 92 a 90 de efectividad destaca las áreas cultivadas y por el contrario en un intervalo de 72 a 76 por ciento corresponde a los territorios con un uso de suelo artificial. Por otra parte, el porcentaje de precisión de forma global descendió dos unidades porcentuales, es decir, un 85.52 por ciento.

Mientras tanto, al realizar el cálculo del coeficiente de Kappa para variables discretas se obtiene una ligera reducción, sin embargo, los resultados son igualmente aceptables debido a que el grado de concordancia entre las variables es sustancial, representando un 77.18 por ciento de probabilidad máxima en función de la concordancia de datos observados y 22.82 del esperado por azar.

Kappa
0.771856249

5.5. Conclusiones

Desde el nacimiento de Tonanitla en el año 2003 como una división territorial administrativa, se ha caracterizado por experimentar transformaciones sustanciales tanto en su demografía como en la configuración espacial de los usos de suelo en su territorio.

Entre los factores que han propiciado que Tonanitla, y principalmente la periferia de la cabecera municipal, se haya tornado en un lugar atractivo para urbanizar sobresale principalmente la no definición de políticas de planeación. Ya que de esto se deriva que el aumento de la población y necesidad de vivienda en conjunto con el precio por metro cuadrado de predios rurales de carácter privado y en un espacio geográfico sin accidentes topográficos sean la alternativa idónea para la generación de nuevos asentamientos, los cuales no siempre se asocian con la dotación de servicios básicos.

En el periodo analizado (2000-2018) entre las variables que denotan el crecimiento urbano en el área de estudio que comprende 4 de 6 localidades municipio destaca:

- Incremento en el número de viviendas en el municipio, agregando en 2015 un 33 % en relación con lo registrado en 2000, por su parte, las localidades periféricas destacan por registrar una mayor proporción de viviendas nuevas.
- Crecimiento demográfico acelerado, aumentando 95% del total de la población municipal, a nivel localidad se presenta una tasa de crecimiento poblacional mayor en las colonias periféricas a la cabecera municipal.
- Aproximadamente un tercio de la población tiene su lugar de nacimiento en otra entidad, siendo las localidades periféricas a Santa María Tonanitla las que atrajeron un mayor porcentaje de población migrante.
- Tonanitla destaca por obtener el valor catastral más bajo y una mayor proporción de claves catastrales rurales de tipo privado con respecto a los municipios colindantes.
- Las localidades con menor coste por metro cuadrado corresponden a la pequeña propiedad agrícola, tasadas con un valor 9 veces inferior a las localidades plenamente urbanizadas ubicadas en la zona céntrica del municipio.
- 1 localidad de 4 presentes en el área de estudio presentó un alto grado de marginación, las restantes obtuvieron un grado bajo.

Por lo que se refiere a caracterizar y clasificar el patrón de crecimiento urbano en el área de estudio se resalta la utilidad de imágenes satelitales y la capacidad de procesamiento de los sistemas de información geográfica.

A partir de clasificaciones supervisadas y no supervisadas se logró mostrar la evolución de un territorio altamente dinámico, permitiendo determinar el patrón de crecimiento urbano en el área de estudio, así como de la cuantificación del ritmo en el que se presentan los cambios. Se analizó el periodo 2010-2018 y se identificaron cuatro usos de suelo distintos: a) áreas terrestres cultivadas y gestionadas, b) vegetación natural y semi natural, c) áreas urbanas y d) superficies artificiales y áreas asociadas.

Entre los cambios más sobresalientes en cuanto a la conformación de los usos de suelo sobresale el del tipo áreas cultivadas ya que redujeron en un 10.8 por ciento en un periodo de años, el pastizal registró un decrecimiento constante, por otro lado el uso que tuvo una mayor adición de extensión fue el de superficies artificiales con un 12.4 por ciento.

De manera que esta reducción de áreas destinadas para la agricultura y de vegetación natural en conjunto con el aumento de áreas artificiales y urbanas supone un cambio de vocación de las actividades primarias pasando a ser espacios propensos a ser edificados y habitables.

El área urbana en el periodo analizado aumentó un 2.2 por ciento, es decir un crecimiento urbano constante y del cual existe una mayor dispersión, ya que los sitios de emplazamiento no se restringen únicamente a la cabecera municipal sino también a la periferia y en áreas remotas sin una continuidad espacial.

Al caracterizar el tipo de crecimiento urbano en el territorio y comparar el patrón imperante en el área en relación con los esquemas propuestos por Wilson (citado en Bhatta, 2010), se obtuvo que el tipo de crecimiento urbano que se está desarrollando en el municipio es del subtipo expansivo.

Esto se deduce debido a que la ocupación urbana en el territorio se caracteriza por una baja densidad, no se produce en forma intensiva y su ubicación no se limita o restringe a las áreas céntricas en la zona de estudio.

En relación con la aplicación del modelo de White basado en autómatas celulares para estudiar el funcionamiento dinámico de las ciudades. Después de una serie de pruebas de validación, entre las características de los escenarios obtenidos en esta tesis destaca:

- Cualitativamente reflejan una alta similitud visual principalmente en la zona central del modelo
- Cuantitativamente, se obtuvo diferencias menores a 2.6 por ciento de área total ocupada entre el escenario real y simulado
- Precisión de 85 por ciento de acuerdo a la matriz de error y un coeficiente de Kappa de .77, representando una buena concordancia entre los datos

Los escenarios para el año 2022 y 2026 muestran una ligera densificación del uso urbano en el área central del municipio y una proliferación de asentamientos dispersos en la periferia de la cabecera municipal acentuándose en la porción norte correspondiente a las localidades La Chinampa y Valle Verde.

Esos asentamientos no forman un continuo espacial y se ubican principalmente en las cercanías a vías de comunicación terrestre, no obstante también se presentaron en espacios alejados de los caminos. Se prevé que el área urbana siga creciendo a un ritmo constante y para el año 2026 represente el 8.1 por ciento del área de estudio.

Por otro lado, hay cambios sustanciales en cuanto al área para usos agrícolas y pecuarios ya que se pronostica reducción (de 48 a 35 por ciento) de su cobertura por una artificial (de 21 a 34 por ciento), el cual es el uso que presenta una mayor afinidad a convertirse en área urbana.

A partir de esto se infiere que la aplicación del modelo cumple con la premisa de la capacidad de simulación del funcionamiento dinámico de las ciudades a partir de la posibilidad de las computadoras y de los algoritmos para ejecutar relaciones simples múltiples entre los diferentes estados que componen el espacio celular.

El modelo fue capaz de integrar las herramientas informáticas para el tratamiento de la información geográfica y la aplicación del principio de vecindad espacial bajo el paradigma de la complejidad, demostrando en esta tesis una perspectiva alternativa para comprender la formación de patrones de los usos de suelo.

6. Conclusiones generales

La finalidad de esta tesis fue la analizar los factores que han originado y fomentado el surgimiento del proceso de dispersión urbana en el municipio de Tonanitla, además de aplicar una metodología para la elaboración de estudios prospectivos dentro del área de estudio mediante un modelo basado en autómatas celulares.

Dicho lo anterior, tras una revisión de información documental y estadística histórica se confirma la hipótesis general acerca de los factores que han generado un crecimiento urbano disperso en el área de estudio correspondiente a Tonanitla.

Se destacan factores socio territoriales como el acelerado crecimiento demográfico, la migración, el tipo y costo de propiedad, las condiciones físicas y la indefinición de un plan de desarrollo urbano como los elementos que favorecen la conversión hacia áreas urbanas en un patrón disperso.

Cabe mencionar que la utilización de imágenes aéreas y los SIG fue de gran utilidad, ya que se consiguió caracterizar el crecimiento urbano del área de estudio y obteniendo aspectos importantes como el patrón, los atributos cualitativos y cuantitativos de los usos de suelo y la velocidad en la que ocurrieron los cambios durante el periodo analizado, además de servir como insumo para el modelo aplicado en esta tesis.

A partir de la información obtenida se precisa que pese a que una proporción importante habita en la Localidad de Santa María Tonanitla y la Asunción; el porcentaje restante se localiza de forma dispersa en el territorio, destacando principalmente la porción norte del municipio en la cual se engloban las localidades de Las Chinampas y Valle Verde.

Estas últimas localidades destacan por registrar, en el periodo bajo análisis, un alto dinamismo en cuanto a la proporción de crecimiento demográfico, migración y la proliferación de nuevas viviendas.

El siguiente aspecto trata del modelo de White, enmarcado dentro del campo de las teorías de la complejidad, empleado para estudiar el funcionamiento dinámico de las ciudades. Se ha eligió esta técnica ya que, como se ha puesto de manifiesto en este trabajo de tesis, es una herramienta que integró el sustento teórico del principio de correlación espacial, los autómatas celulares y la capacidad de procesamiento de las computadoras.

Como aportación de esta tesis, al considerar el comportamiento global del sistema urbano desde las correlaciones identificadas entre los factores que componen el modelo, se obtuvieron posibles escenarios de cambios de usos de suelo a corto y mediano plazo de las cuales se puede localizar visualmente las zonas en las que se espera crecimiento urbano, así como de poder comparar y contrastar la información cuantitativa de sus atributos.

Dicho lo anterior, se prevé para el año 2022 y 2026 continúe la tendencia de reducción del área agrícola y de vegetación natural por usos artificiales y de área urbana, proliferando asentamientos dispersos en la porción norte del territorio y densificando ligeramente el área urbanizada de las Localidades de La Chinampa y Valle Verde

Como consideraciones finales se recomienda la aplicación de este tipo de metodologías debido a que los resultados (escenarios simulados) pueden complementar la comprensión de fenómenos o procesos abordados con métodos analíticos. Otro aspecto a destacar es la capacidad de experimentar con sistemas complejos, puesto que con una serie de reglas simples se puede obtener patrones emergentes, lo cual podría ser complicado obtener este tipo de información a partir de métodos tradicionales.

No obstante entre los inconvenientes de la aplicación de este modelo fue la ligera divergencia del patrón en el territorio simulado, ya que factores relevantes no fueron tomados a consideración y la probable futura inclusión resulte en escenarios con una mayor afinidad. Entre los factores a considerar en futuras aplicaciones sería la implementación de factores como el peso en función del tipo de vialidad, ya que se observó en los mapas reales un patrón de ubicación de los distintos tipos de asentamientos de acuerdo a la vialidad. Además, dado la condición anteriormente citada otros elementos que repercuten son la conformación de la tenencia de la tierra y la subdivisión de los predios.

Finalmente, se recomienda resaltar que la generación de simulaciones no radica únicamente en la capacidad de predecir comportamientos no lineales, sino, se trata de un ejercicio para experimentar los efectos futuros de la dinámica urbana presente.

Por lo que, los resultados obtenidos por parte del modelo pueden servir al analista territorial y de las relaciones espaciales como elemento auxiliar para generar instrumentos y herramientas de aplicación local desde la perspectiva del desarrollo urbano sostenible.

Referencias bibliográficas

- Abramo, P. (2012). La ciudad difusa: mercado y producción de la estructura urbana en las grandes metrópolis latinoamericanas. Recuperado el 9 de marzo de 2019 de: <https://www.redalyc.org/pdf/196/19623150002.pdf>
- Anand, A. (2017). Accuracy assesment. Recuperado el 22 de abril de 2020 de: <http://egyankosh.ac.in/handle/123456789/39544>
- Anzano, J. (2012). El proceso de urbanización en el mundo. El sistema urbano. Tipos de urbanismo. Repercusiones ambientales y económicas. Recuperado el 28 de febrero de 2019 de: <http://clio.rediris.es/n36/oposicones/tema09.pdf>
- Anzurritua, M y Campos, J. (2012). Complejidad y sistemas sociales: Un modelo adaptativo para la investigación interdisciplinaria. México: UNAM, Centro de investigaciones interdisciplinarias.
- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. Santiago, Chile: Cinta de Moebio.
- Arteaga, I. (2005). De periferia a ciudad consolidada: Estrategias para la transformación de zonas urbanas marginales. Recuperado el 20 de febrero de 2019 de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/18741/19636>
- Ayuntamiento constitucional de Tonanitla. (2009). Plan de desarrollo municipal 2009-2012. Recuperado el 2 de Marzo de 2019 de: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2012/118/11/2cb8632e4cfc98d0967995d39251132b.pdf
- Ayuntamiento constitucional de Tonanitla. (2013). Plan de desarrollo municipal 2013-2015. Recuperado el 2 de Marzo de 2019 de: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2013/118/11/7b7287881f0007eec3f5c756418b9f8e.pdf
- Ayuntamiento constitucional de Tonanitla. (2016). Plan de desarrollo municipal 2016-2018. Recuperado el 2 de Marzo de 2019 de: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/118/11/d3ae1f58d87a5b8f78d564f06b630048.pdf
- Ayuntamiento de Tonanitla. (2010). Gaceta municipal: Bando municipal 2010. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Eliminados/wo45170.pdf>
- Ayuntamiento de Tonanitla. (2018). Gaceta municipal: Bando municipal 2018. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de: <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo2018/bdo109.pdf>
- Azcárate, L. (2012). Pautas del modelo de crecimiento actual en el marco de la ciudad difusa. Rasgos básicos en las principales aglomeraciones urbanas de nuestro país. Recuperado el 11 de marzo de 2019 de: http://www.geogra.uah.es/simurban1/PDF/pdf_2012/primer_capitulo.pdf
- Batty, M. (2005). Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent Based, Models and Fractals. Londres, Inglaterra: MIT press.
- Bazant, J. (2001). Lineamientos para el ordenamiento territorial de las periferias urbanas de la Ciudad de México. Recuperado el 1 de marzo de 2019 de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252001000100010&lang=pt
- Bertalanffy, L. (1989). Teoría general de los sistemas: Fundamento, desarrollo y aplicaciones. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Bhatta, B. (2010). Analysis of urban growth and Sprawl from remote sensing data. Londres, Inglaterra: Editorial Springer.
- Bottino, R. (2009). La ciudad y la urbanización. Recuperado el 1 de marzo de 2019 de: http://www.estudioshistoricos.org/edicion_2/rosario_bottino.pdf

- Buzai, G., Cacace, G., Humataca, L. y Lanzerotti (Comp.). (2015). Teoría y métodos de la geografía cuantitativa. Argentina, Buenos Aires: MCA libros.
- Camacho, G. (2012). Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basados en autómatas celulares. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Capel, H. (1975). La definición de lo urbano. Estudios geográficos. Vol. 36 (N. 138). Págs. 265-302.
- Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. (2016). "Definición", en *Vivienda*. Recuperado el 2 de diciembre de 2019 de: [http://archivos.diputados.gob.mx/Centros_Estudio/Cesop/Comisiones/d_vivienda.htm#\[Citar%20como\]](http://archivos.diputados.gob.mx/Centros_Estudio/Cesop/Comisiones/d_vivienda.htm#[Citar%20como])
- CEPAL. (2007). Panorama multidimensional del desarrollo urbano en Latinoamérica y el Caribe. Recuperado el 20 de octubre de 2019 de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/41974/1/S1700257_es.pdf
- CEPAL. (2009). Grado de urbanización, Recuperado el 1 de marzo de 2019 de: https://celade.cepal.org/redatam/ryesp/cairo/WebHelp/Metalatina/grado_de_urbanizacion.htm
- CONAPO. (2008). Informe de México: El cambio demográfico, el envejecimiento y la migración internacional en México. Recuperado el 4 de marzo de 2019: http://seminarioenvejecimiento.unam.mx/Publicaciones/articulos/cambio_demografico.pdf
- CONAPO. (2010). Delimitación de zonas metropolitanas. Recuperado el 28 de agosto de 2019 de: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010
- CONAPO. (2016). Datos abiertos del índice de marginación. Recuperado el 15 de diciembre de 2019 de: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_del_Indice_de_Marginacion
- Congalton, R. (2005). Thematic and Positional Accuracy Assessment of Digital Remotely Sensed Data. Recuperado el 19 de junio de 2021 de: https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_wo077/gtr_wo077_149.pdf
- Correa, G. (2012). Construcción y acceso a la vivienda en México; 2000-2012. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-49642014000100005
- Díaz, D. (2013). Reforma urbana 100 ideas para las ciudades de México. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de: <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2013/10/ReformaUrbana100IdeasparalasCiudadesdeMexico.pdf>
- Domínguez, V y López, M. (2016). Teoría general de sistemas, un enfoque práctico. Recuperado el 13 de julio de 2019 de: http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v10n3/Data/Teoria_General_de_Sistemas_un_enfoque_practico.pdf
- Economía Solidaria. (2012). Vivienda: La necesidad de una vivienda digna. Un espacio en el que estar, construir y compartir. Recuperado el 9 de marzo de 2019 de: https://www.economiasolidaria.org/sites/default/files/guia_cr_valencia_vivienda.pdf
- Erba, D. (2013). Definición de políticas de suelo urbano en América Latina: Teoría y práctica. Recuperado el 6 de marzo de 2019 de: <https://www.lincolnst.edu/sites/default/files/pubfiles/definicion-de-politicas-de-suelo-urbanas-full.pdf>
- ESRI. (2019). Evaluación de la exactitud en la clasificación de la imagen. Recuperado el 22 de abril de 2020 de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/accuracy-assessment-for-image-classification.htm>
- Flores, A. y Thomas, J. (1993). Cuadernos de geografía. Colombia: Revistas UNAL.
- Flores, S (Coord.). (2012). Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México. Recuperado el 18 de octubre de 2019 de: <https://www.puec.unam.mx/index.php/publicaciones/145-publicaciones-digitales/pd-instituciones/147-presentacion-del-programa-de-ordenacion-de-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-actualizacion-2012-sintesis-ejecutiva>
- García, E. (2016). Turismo residencial y espacio urbano: Reflexiones teóricas. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de: <http://www.eumed.net/rev/turydes/21/urbanismo.html>

- García, R. (2006). *Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, España: Gedisa editorial.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, España: Gedisa editorial.
- Gobierno constitucional del Estado de México. (2003). *Gaceta del gobierno*. Recuperado el 23 de noviembre de 2019 de: <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2003/jul292.pdf>
- Gutiérrez, M. (2003). *Desarrollo y distribución de la población urbana en México*. *Investigaciones geográficas*. Recuperado el 27 de octubre de 2019 de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100010
- Gutiérrez, M. González, J y Zamorano, J. (2005). *La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales*. Ciudad Universitaria, México: Instituto de Geografía UNAM.
- Hashemian, M. (2004). *Study of sampling methods for accuracy assessment of classified remotely sensed data*. Recuperado el 19 de junio de 2021 de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.184.4023&rep=rep1&type=pdf>
- Hernández, A. (1996). *El estudio del crecimiento de las poblaciones humanas* *Papeles de Población*. Recuperado el 4 de marzo de 2019 de: <https://www.redalyc.org/pdf/112/11201002.pdf>
- Hernández, J. (2008). *R₀ y algunas generalizaciones en autómatas celulares*. Recuperado el 12 de agosto de 2019 de: <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/152/2/TE%20270.pdf>
- Hiernaux, D. (2007). *Repensar la ciudad: La dimensión ontológica de lo urbano*. Recuperado el 21 de febrero de 2019 de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/liminar/v4n2/2007-8900-liminar-4-02-7.pdf>
- Hobsbawn, E. (1994). *Historia del siglo XX*. Argentina, Buenos Aires: Critica Grijalbo Mondadori
- IGECEM. (2017). *Información Estadística en Catastro*. Recuperado el 15 de diciembre de 2019 de: <http://igecem.edomex.gob.mx/servicios>
- INAFED. (2003). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Recuperado el 20 de agosto de 2019 de: <http://inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15125a.html>
- INAFED. (2010). *guía técnica de la administración de catastro municipal*. Recuperado el 21 de octubre de 2019 de: http://www.inafed.gob.mx/work/models/inafed/Resource/335/1/images/guia21_la_administracion_del_catastro_municipal.pdf
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Resultados definitivos, tabulados básicos*. México, Aguascalientes.
- INEGI. (2005). *II Conteo General de Población y Vivienda 2005, Resultados definitivos, tabulados básicos*. México, Aguascalientes.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal: Tonanitla*. Recuperado el 20 de marzo de 2019 de: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15125.pdf
- INEGI. (2010). *Marco geoestadístico nacional*. Recuperado el 20 de diciembre de 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas>
- INEGI. (2010). *XIII Censo General de Población y Vivienda 2000, Resultados definitivos, tabulados básicos*. México, Aguascalientes.
- INEGI. (2015). *Características de los hogares*. Recuperado el 12 de marzo de 2019 de: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/hogares/>
- INEGI. (2015). *Encuesta intercensal 2005, tabulados básicos*. México, Aguascalientes.
- INEGI. (2016). *Marco censal agropecuario, Resultados definitivos, tabulados básicos*. México, Aguascalientes.

- INEGI. (2018). Marco geoestadístico nacional. Recuperado el 20 de diciembre de 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas>
- INEGI. (s.f). Glosario de términos. Recuperado el 1 de marzo de 2019 de: <http://cuentame.inegi.org.mx/glosario/u.aspx?tema=G>
- IPOMEX. (2012). Atlas municipal de riesgos, Tonanitla. Recuperado el 10 de abril de 2019 de: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2012/138/11/68d91d9b6214f472eb30597dcd944cfd.pdf
- Jiménez Sama. (2009).Urbanización. Recuperado el 28 de febrero de 2019 de: <https://www.construmatica.com/construpedia/Urbanizaci%C3%B3n>
- Johansen, O. (1993). Introducción a la Teoría General de Sistemas. México, D.F.: Limusa.
- Laguna, G. Marcelin, R. Patrick y Vázquez, G. (2016). Complejidad y sistemas complejos: Un acercamiento multidimensional. México: Editora C3, Coplt-arXives.
- Lara, J. (2017). Los costos de la expansión urbana: aproximación a partir de un modelo de precios hedónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México. Recuperado el 5 de marzo de 2019 de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/educm/v32n1/2448-6515-educm-32-01-00037.pdf>
- Lattes, A. (1993). Urbanización, crecimiento urbano y migraciones en América Latina. Recuperado el 21 de febrero de 2019 de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38594/NP62-06_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- López, J. (2004). EL URBANISMO DE LADERA: Un reto ambiental, tecnológico y del ordenamiento territorial. Recuperado el 8 de marzo de 2019 de: <https://www.redalyc.org/html/748/74800814/>
- Méndez, R. (2018). La termodinámica de los sistemas complejos. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morín, E. y Pakman, M. 1998. Introducción al pensamiento complejo. Barcelona, España: Editorial Gedisa.
- Muñoz, I y García, L. (2013). Anatomía de la dispersión urbana en Barcelona. Eure. Vol. 39 (N. 116). Págs. 189-219.
- Ochoa, C y Molina, M. (2017). Evaluación de la precisión de pruebas diagnósticas. Recuperado el 25 de abril de 2020 de: https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13048-RUTA/Fundamentos_MBE_28.pdf
- Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Recuperado el 16 de junio de 2019 de: https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2018/07/Libro_SIG-victor-olaya-PARTE-I.pdf
- Olivera, G. (2017). Continuidad de la urbanización informal en los espacios de pobreza metropolitanos, rémora del desarrollo y déficit de la política de vivienda: Cuernavaca, México. Recuperado el 12 de noviembre de 2019 de: <http://www.scielo.org.co/pdf/terri/n39/0123-8418-terri-39-00097.pdf>
- ONU. (2016). Urbanización y desarrollo: futuros emergentes. Recuperado el 27 de febrero de 2019 de: <http://nua.unhabitat.org/uploads/Reportedelasciudades2016.pdf>
- ONU. (2018). World Urbanization prospects. Recuperado el 20 de octubre de 2019 de: <https://population.un.org/wup/DataQuery/>
- Osorio, J. (2008). Introducción al pensamiento complejo. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle, Programa editorial, Colección ingeniería.
- Palma, J y Marín, R. (2008).Inteligencia Artificial: Técnicas, métodos y aplicaciones. Madrid, España: Mc Graw Hill – Interamericana de España.
- Palomares, H. (2004). Planeación versus Administración del Crecimiento Urbano. Recuperado el 11 de marzo de 2019 de: <http://www.mundourbano.unq.edu.ar/index.php/ano-2003/52-numero-20/71-4-planeacion-versus-administracion-del-crecimiento-urbano>

- Ponce, G. (2017). Paradojas del derecho a la vivienda digna y al valor suelo. Recuperado el 8 de marzo de 2019 de: <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/3766/Cuaderno%20de%20investigaci%C3%B3n%2036.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quintana, M. (2008). Sistemas complejos y patrones emergentes. Recuperado el 28 de julio de 2019 de: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/59_1/PDF/11Art497.pdf
- RAE. (2018). Calibrar: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de mayo de: <https://dle.rae.es/calibrar>
- RAE. (2018). Sistema: Diccionario de la lengua española- Edición del tricentenario. Recuperado el 13 de julio de 2019 de: <https://dle.rae.es/?id=Y2AFX5s>
- RAE. (2018). Urbanizar. Recuperado el 28 de febrero de 2019 de: <https://dle.rae.es/?id=b8UJmFo>
- RAE. (2019). Artificial: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de agosto de: <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=artificial>
- RAE. (2019). Autómata: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de agosto de: <https://dle.rae.es/?id=4TKy9Vs>
- RAE. (2019). Célula: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de agosto de: <https://dle.rae.es/?id=8B5hd4v>
- RAE. (2019). Estado: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de agosto de: <https://dle.rae.es/?id=GjghajH>
- RAE. (2019). Inteligencia: Diccionario de la lengua española - Edición del tricentenario. Recuperado el 10 de agosto de: <https://dle.rae.es/srv/fetch?id=LqtyoaQ%7CLqusWqH>
- Rahim, A. (2016). Etalement urbain et géoprospective: apports et limites des modèles de spatialisation. Recuperado el 2 de octubre de 2019 de: <https://journals.openedition.org/cybergeog/27668>
- Reyes, D. (2011). Descripción y aplicación de las Autómatas celulares. Recuperado el 24 de agosto de 2019 de: http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf
- Romero, J. Dafonte, C. Gómez, A y Penosa, F. (2007). Inteligencia artificial y computación avanzada. Santiago de Compostela, España: Publicaciones de la fundación Alfredo Brañas, Colección informática.
- Ruiz, E y Solana, J. (2013). Complejidad y Ciencias Sociales. Sevilla, España. EDITAN: Universidad Internacional de Andalucía.
- Sancho, F. (2016). Autómatas celulares. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=66>
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano de Estado de México. (2018). Los planes municipales de desarrollo urbano. Recuperado el 12 de noviembre de 2019 de: https://seduym.edomex.gob.mx/planes_municipales_de_desarrollo_urbano
- Secretaría del Medio Ambiente. (2010). Diagnóstico ambiental del municipio de Tonanitla. Recuperado el 12 de febrero de 2019 de: https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_diag_amb_tonanitla.pdf
- SEDATU. (2019). Programa nacional de vivienda 2019- 2014. Recuperado el 16 de diciembre de 2019: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/514070/Programa_Nacional_de_Vivienda_2019-2024.pdf
- SEDESOL. (2010). Guía metodológica para elaborar programas municipales de ordenamiento territorial. Recuperado el 3 de noviembre de 2019 de: http://www.inapam.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1592/1/images/Guia_metodologica.pdf
- SEDESOL. (2015). Catálogo de localidades: Cédula de información municipal. Recuperado el 18 de marzo de 2019 de: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=15&mun=125>

- Selva, B. (2012). Revolución industrial III. Recuperado el 1 de marzo de 2019 de: <https://economipedia.com/historia/tercera-revolucion-industrial.html>
- Soto, J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. Recuperado el 7 de marzo de 2019 de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5926288>
- UACM. (2014). Documento maestro de la Maestría en Ciencias de la Complejidad. Recuperado el 12 de julio de 2019 de: http://complejidad.uacm.edu.mx/images/DocumentosPDF/MCC_Master_Doc_marzo_2014.pdf
- UNICEF. (2012). The State of the World's Children 2012: Children in a urban growth. Recuperado el 28 de marzo de 2019 de: <https://www.unicef.org/spanish/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-Definiciones.pdf>
- Vivanco, M. (2008). Documentos de trabajo: Temas de complejidad. Facultad de Ciencias Sociales: Universidad de Chile.
- White, R. (1996). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 24 (N. 3). Págs. 323-343.

Anexos

A.1. NetLogo

NetLogo es un software (gratuito de código abierto) de programación adaptado al modelado/simulación desarrollado por El Centro para el Aprendizaje Conectado y el Modelado por Computadora (CCL) de la Universidad de Northwestern.

Usando el entorno de NetLogo se ha generado una gran cantidad de modelos de fenómenos complejos en los mundos naturales y sociales ya que destaca por las siguientes características:

- Adecuado para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo
- Conveniente para modelar el comportamiento de centenares o miles de individuos (personas, bacterias, insectos, organizaciones, nodos de un grafo, etc.) que interactúan entre sí y con el entorno
- Permite explorar la conexión entre las interacciones locales a nivel de individuo y los patrones macroscópicos que emergen de dichas interacciones.

Es también un ambiente de programación fácil e intuitivo de usar para crear y probar nuevos modelos:

- Permite abrir y experimentar simulaciones.
- Posibilita crear modelos para comprobar hipótesis sobre sistemas descentralizados.
- Incluye con una gran biblioteca de simulaciones en ciencias naturales y sociales, que pueden ser usadas y modificadas.
- Posee una interfaz gráfica intuitiva y fácil de usar.
- Emplear reglas simples a agentes individuales en una simulación y observar el resultado colectivo del comportamiento de todos los agentes.

Estos modelos pueden explorarse y revisarse como parte de la investigación basada en modelos además de servir como base para la investigación en entornos más avanzados. Estas nuevas tecnologías permiten tener experiencias tanto a nivel micro como a nivel macro, las cuales difícilmente se obtendrían sin tales tecnologías haciendo que el nuevo conocimiento sea útil para dar sentido a un mundo complejo.

A.1.1. Requisitos del sistema

Windows

NetLogo se ejecuta en Windows 10, Windows 8, Windows 7 y Vista. NetLogo 5.2.1 fue la última versión compatible con Windows XP y Windows 2000. El instalador de NetLogo para Windows requiere de Java 8 solo para uso privado de NetLogo.

Mac OS X

Se requiere Mac OS X 10.8.3 o posterior. (NetLogo 5.1 fue la última versión que admitió 10.5 y 10.4; NetLogo 5.2.1 fue la última versión que admitió 10.6 y 10.7).

A.1.2. Extensión SIG

Es posible integrar datos elaborados a partir de sistemas de información geográfica en NetLogo. El software incluye los requerimientos técnicos para importar información geométrica de elementos en formato vectoriales desarrollado por la compañía ESRI (Shapefile .shp), así mismo, la extensión admite datos raster ESRI ASCII (.asc).

A.1.3. Código del modelo de Roger White en NetLogo 5.3.1.

En el código empleado se especifica las funcionalidades de cada uno de los elementos incluidos en la ecuación de Roger White, teniendo como variable de entrada los parámetros que se otorgan en los botones expuestos en la pestaña Ejecutar.

De igual forma, en el código se designa los archivos en formato ASCII empleados para la generación de las simulaciones, el primero de ellos, corresponde a la configuración de los usos de suelo en la condición inicial de 2014, y por otro lado el archivo que representa los estados fijos del modelo, es decir, las vías de comunicación terrestre.

Ambos archivos poseen la misma extensión y resolución, la cual se determinó en una dimensión de 10 por 10 píxeles de resolución.

1.3 Ambiente de programación

La versión de NetLogo empleada en este estudio fue la 5.3.1, en el ambiente de programación del programa se incluye en la parte superior tres secciones principales ejecutar, información y código.

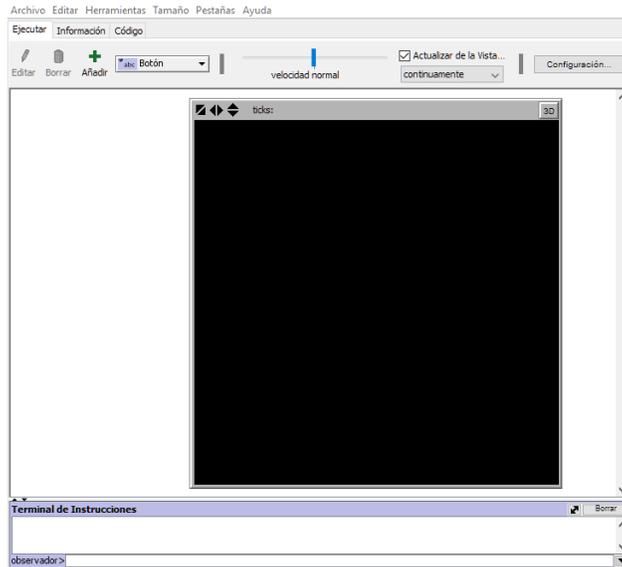


Figura A.1. Interfaz de software NetLogo v.5.3.1.

En la primera de las pestañas (ejecutar) será donde se represente el modelo, así mismo, es la sección en la cual se observa la evolución del objeto de estudio. También se incluye herramientas como contadores y gráficos que pueden ser empleados para inspeccionar lo que sucede en el modelo y monitorear sus atributos.



Figura A.2. Interfaz del modelo de cambios de uso de suelo en Tonanitla

En la segunda pestaña (información) proporciona una introducción al modelo debido a que podremos añadir la información acerca del modelo desarrollado para informar a los usuarios. A pesar de ser opcional el llenado de la información, su importancia radica en la posibilidad de informar qué sistema se está modelando, cómo se creó el modelo y cómo usarlo para futuros usuarios.

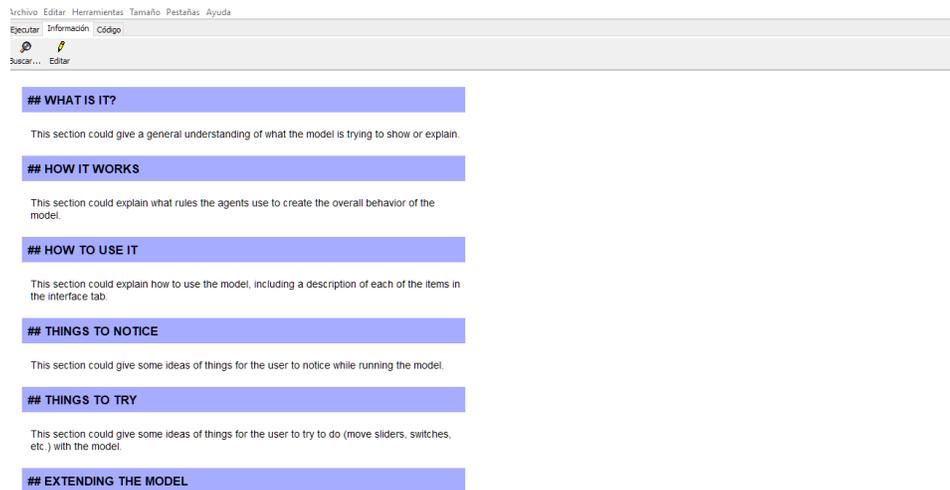


Figura A.3. Pestaña de información en NetLogo v. 5.3.1.

Y la última sección (código), corresponde al espacio en el cual se especifican todos elementos incluidos en la interfaz y sus funcionalidades, de igual forma se describen los procedimientos para llevar a cabo la ejecución del modelo.



Figura A.4. Pestaña de código del modelo de cambios de uso de suelo en Tonanitla

A.2. Componentes de la interfaz del modelo de Roger White en NetLogo 5.3.1.

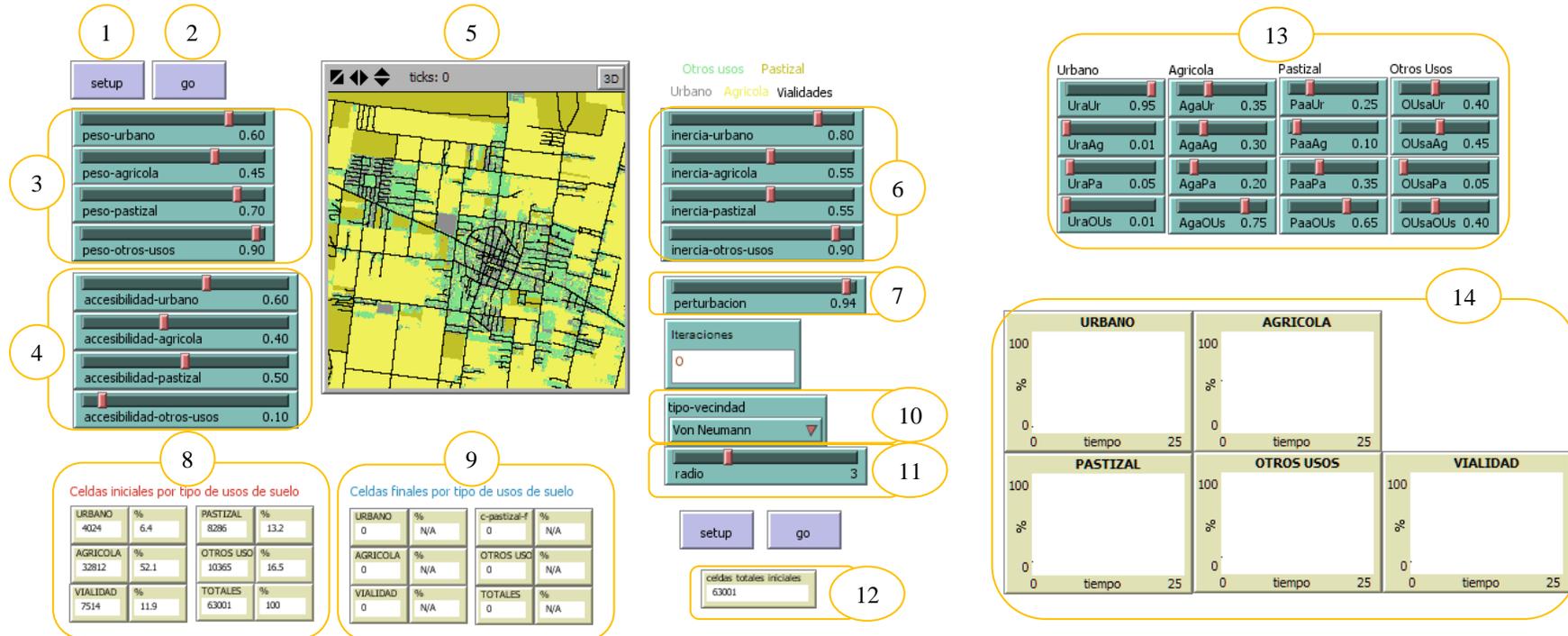


Figura A.4. Interfaz del modelo de White para la simulación de cambios de uso de suelo

1 Carga el archivo ASCII del área de estudio	6 Valor de accesibilidad de inercia	11 Radio de vecindad
2 Comenzar simulación	7 Perturbación estocástica	12 Total de celdas en espacio celular
3 Valor de variable peso	8 Conteo de celdas iniciales por uso de suelo	13 Matriz de probabilidades de cambio
4 Valor de variable accesibilidad	9 Conteo de celdas finales por uso de suelo	14 Graficas de cambio de los usos de suelo
5 Espacio celular	10 Tipo de vecindad	