



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Predicción de pérdida de cobertura natural y
áreas de conservación por el crecimiento de
los asentamientos humanos en la Cuenca de
México.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A :

Nirani Corona Romero



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gustavo Manuel Cruz Bello

2010



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.

Hoja de datos del Jurado

1. Datos del alumno

Corona
Romero
Nirani
56 75 66 72
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
300206342

2. Datos del tutor

Dr.
Gustavo Manuel
Cruz
Bello

3. Datos del sinodal 1

M. en C.
Francisco
Moreno
Sánchez

4. Datos del sinodal 2

Dr.
José Fernando
Aceves
Quesada

5. Datos del sinodal 3

Dr.
José Antonio Benjamín
Ordóñez
Díaz

6. Datos del sinodal 4

M. en C.
Antonito
González
Hernández

7. Datos del trabajo escrito

Predicción de pérdida de cobertura natural y áreas de conservación por el crecimiento de los asentamientos humanos en la Cuenca de México.
108 p.
2010

DEDICATORIA

A mi madre... porque siempre ha tenido fe en mí, creyendo en lo que me pasa y apoyándome en mis peores momentos, gracias por darme esa protección que tantas veces me ayudó a superar mis peores miedos.

A mi padre... por brindarme su apoyo sin pedir cuentas y por darme la libertad de decidir.

A mi abuelito Ildefonso Romero... por enseñarme a amar a la naturaleza.

A mi abuelita Carmen de Romero... porque con tu muerte me enseñaste muchas cosas.

A mis hermanos... por sus palabras de apoyo en mi vida y en este ciclo que hoy concluye.

A Mauricio... por ser la inspiración, el aliciente y la razón para terminar este ciclo y para continuar en esta aventura llamada vida. Gracias por todo lo que me has permitido conocer de mi persona y por darme esa paz que sólo tú sabes transmitirme. TE AMO.

A Lore... por ser compañera de voz, de carrera, de sueños... y por nunca dejarme sola, ni siquiera en mis peores momentos, gracias amiga.

A Paco... por ser un ángel en mi vida que siempre tiene una salida cuando todo parece estar cerrado, por darme luz y esperanza y sobre todo, por ser mi amigo.

A Memo... por brindarme tu oído y tu consejo cuando nadie más lo hizo.

A Gaby... por ayudarme a conocer una parte de mí, a crecer en muchos aspectos y a creer en otras posibilidades.

A David... porque con tu compañía, el primer intento fallido de tesis fue más llevadero y porque con tus palabras alegraste muchos momentos.

A Paty y Marco... por ayudarme a salir adelante en los momentos más difíciles.

A Miguel y Pablo... por intentar hacerme sonreír en los momentos más amargos, por su apoyo y por todas las anécdotas.

Agradecimientos

Al Dr. Gustavo Cruz por confiarme este proyecto.

Al M. en C. Antonio González por capacitarme en el manejo de los programas que se utilizaron para este proyecto.

Al Especialista en Geomática Mauricio Galeana por su apoyo en el proceso metodológico.

Al Especialista en Geomática Guillermo Martínez por capacitarme en la clasificación de imágenes de satélite.

Al M. en C. Francisco Moreno por ayudarme con las cuestiones logísticas de este trabajo.

Al Laboratorio de Geomática por permitirme el uso de sus instalaciones para la elaboración de este proyecto.

A todos los compañeros del Laboratorio de Geomática por hacerme más ameno este proceso.

Al Dr. Fernando Aceves por mostrarme un camino nuevo dentro de la biología.

Al Dr. Antonio Ordóñez por sus valiosos comentarios y sugerencias para el enriquecimiento de este proyecto.

A Alejandro Rojas porque se la debo de mi primer intento fallido de tesis, en el que me apoyó con la armada de rompecabezas.

*Nuestra tarea es aprender,
llegar a ser divinos a través del conocimiento.*

Sabemos tan pocas cosas...

Gracias al conocimiento nos acercamos a Dios,

y entonces podemos descansar.

Después volvemos

para enseñar y ayudar a los demás.

Los Mensajes de los Sabios

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Crecimiento urbano	3
2.2 Modelos de crecimiento urbano	4
2.2.1 Modelos Estáticos.....	4
2.2.2 Modelos Dinámicos.....	4
2.2.2.1 Autómatas Celulares.....	5
2.2.2.2 Modelos de crecimiento urbano con Autómatas Celulares	7
2.2.2.3 El modelo SLEUTH	8
3. ANTECEDENTES	14
3.1 Crecimiento urbano en la Cuenca de México.....	14
3.2 Problemática	15
4. JUSTIFICACIÓN.....	17
5. OBJETIVOS	17
6. LA CUENCA DE MÉXICO	18
6.1 Situación geográfica	18
6.2 Origen de la Cuenca de México	19
6.3 Geología	20
6.4 Geomorfología.....	21
6.5 Clima	21
6.6 Hidrología.....	21
6.7 Edafología.....	22
6.8 Vegetación.....	22
7. MÉTODOS.....	26
7.1 Definición del área de estudio	26
7.2 Generación de las capas para SLEUTH	26
7.2.1 Área urbana	26
7.2.2 Vías de transporte terrestre.....	28
7.2.3 Pendiente del terreno y sombreado.....	29
7.2.4 Áreas de exclusión.....	29
7.3 Conversión a formato Gif.....	30
7.4 Corrida de los dos escenarios del modelo SLEUTH	30
7.4.1 Calibración de los escenarios	30
7.4.1.1 Calibración bruta	30
7.4.1.2 Calibración fina	30
7.4.1.3 Calibración final	31
7.4.1.4 Calibración de predicción.....	31
7.4.1.5 Corrida de la predicción	32

7.5. Transformación y manejo de la información obtenida de SLEUTH.....	32
7.6. Clasificación de las imágenes de satélite.....	32
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
8.1 Crecimiento de los asentamientos humanos	35
8.1.1 Crecimiento en la Cuenca de México.....	35
8.1.1.1 Crecimiento de 1985 a 2008	35
8.1.1.2 Crecimiento proyectado con SLEUTH.....	38
8.1.2 Crecimiento en el Distrito Federal	40
8.1.2.1 Crecimiento de 1985 a 2008	40
8.1.2.2 Crecimiento modelado con SLEUTH.....	44
8.1.3 Crecimiento en el Estado de México.....	49
8.1.3.1 Crecimiento de 1985 a 2008	49
8.1.3.2 Crecimiento modelado con SLEUTH.....	54
8.1.4 Crecimiento en Hidalgo.....	61
8.1.4.1 Crecimiento de 1985 a 2008	61
8.1.4.2 Crecimiento modelado con SLEUTH.....	64
8.1.5 Crecimiento en Tlaxcala y Puebla.....	68
8.1.5.1 Crecimiento de 1985 a 2008	68
8.1.5.2 Crecimiento modelado con SLEUTH.....	71
8.2 Pérdida de UGA´s por el crecimiento de los asentamientos humanos en la Cuenca de México.....	76
8.2.2 Pérdida al 2008	76
8.2.1 Pérdida por el crecimiento modelado con SLEUTH.....	76
8.3 Pérdida de Áreas Naturales Protegidas por el crecimiento de los asentamientos humanos	83
8.3.1 Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan.....	83
8.3.2 Parque Nacional Histórico de Coyoacán.....	84
8.3.3 Parque Nacional Cerro de la Estrella.....	84
8.3.4 Parque Nacional Los Remedios.....	86
8.3.5 Parque Nacional Lomas de Padierna.....	88
8.3.6 Parque Nacional El Tepeyac.....	88
8.3.7 Parque Nacional Sacromonte.....	89
8.3.8 Parque Nacional Molino de las Flores.....	90
8.4 Clasificación de las imágenes de satélite.....	93
8.5 Pérdida de cobertura natural por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH	95
8.5.1 Pérdida de cobertura en el Distrito Federal	96
8.5.2 Pérdida de cobertura en el Estado de México.....	97
8.5.3 Pérdida en Hidalgo y Tlaxcala.....	98
8.6 Ideas generales de la discusión.....	99
9. CONCLUSIONES	102
10. REFERENCIAS	103
11. ANEXOS	109

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Valores asignados a los píxeles de los diferentes caminos para el modelo SLEUTH.
- Tabla 2.** Área de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008.
- Tabla 3.** Tasa de crecimiento e incremento por periodo de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008.
- Tabla 4.** Área de los asentamientos humanos de los escenarios E1 y E2 modelados con SLEUTH.
- Tabla 5.** Incremento de los asentamientos humanos de los dos escenarios modelados por SLEUTH en los periodos 2008-2020 y 2020-2035.
- Tabla 6.** Superficie de los asentamientos humanos del Distrito Federal de 1985 a 2008.
- Tabla 7.** Superficie de los asentamientos humanos del Distrito Federal de E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 a 2035.
- Tabla 8.** Superficie de los asentamientos humanos del Estado de México de 1985 a 2008.
- Tabla 9.** Superficie de los asentamientos humanos en el Estado de México del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.
- Tabla 10.** Superficie de los asentamientos humanos en Hidalgo de 1985 a 2008.
- Tabla 11.** Superficie de los asentamientos humanos en Hidalgo del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.
- Tabla 12.** Superficie de los asentamientos humanos en Tlaxcala de 1985 a 2008.
- Tabla 13.** Superficie de los asentamientos humanos en Puebla de 1985 a 2008.
- Tabla 14.** Superficie de los asentamientos humanos en Tlaxcala del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.
- Tabla 15.** Superficie de los asentamientos humanos en Puebla del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.
- Tabla 16.** Pérdida de superficie al 2008 de las Unidades de Gestión Ambiental (UGA's), establecidas en los OET's de los estados de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos.
- Tabla 17.** Pérdida de superficie de las Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) establecidas en los OET's de los estados de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH (E1 y E2).
- Tabla 18.** Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos en el periodo 1985-2008 de las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la Cuenca de México.
- Tabla 19.** Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH, en el periodo 2008-2035, de las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la Cuenca de México.
- Tabla 20.** Matriz de confusión de la clasificación de la capa de vegetación y uso de suelo 2008.
- Tabla 21.** Estadísticos obtenidos de la clasificación de la capa de vegetación y uso de suelo 2008.
- Tabla 22.** Superficie de las coberturas del terreno de la Cuenca de México, 2008.
- Tabla 23.** Pérdida de superficie de la cobertura natural de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Representación gráfica de las reglas del juego de la vida
- Figura 2.** Ciclo de crecimiento, la unidad básica del modelo SLEUTH
- Figura 3.** Fases del modelo SLEUTH
- Figura 4.** Diagrama de flujo de una de calibración
- Figura 5.** Diagrama general del proceso de predicción
- Figura 6.** Quince combinaciones de los valores de los coeficientes para las iteraciones Monte Carlo de las 3125 posibles
- Figura 7.** Ubicación de la Cuenca de México
- Figura 8.** Porcentaje de ocupación de los estados en la Cuenca de México.
- Figura 9.** Sierras de la Cuenca de México
- Fig. 10. Crecimiento de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los estados que ocupan la Cuenca de México**
- Figura 11.** Municipios conurbados de la Cuenca de México de 1980 a 2007
- Fig. 12.** Crecimiento de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008 y de los dos escenarios modelados con SLEUTH de 2008 a 2035.
- Figura 13.** Crecimiento de los asentamientos humanos en los estados que ocupan la Cuenca de México de 2008 a 2035 de los escenarios E1 y E2 modelados con SLEUTH
- Figura 14.** Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en las delegaciones del Distrito Federal. Las delegaciones se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 1985-1995.
- Figura 15.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995
- Figura 16.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001
- Figura 17.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008
- Figura 18.** Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en las delegaciones del Distrito Federal.
- Figura 19.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH
- Figura 20.** Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en las delegaciones del Distrito Federal.
- Figura 21.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH
- Figura 22.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH.
- Figura 23.** Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH.
- Figura 24.** Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios del Estado de México.
- Figura 25.** Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995. Norte y sur del estado.
- Figura 26.** Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001. Norte y sur del estado.

Figura 27. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008. Norte y sur del estado

Figura 28. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 29. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios del Estado de México.

Figura 30. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios del Estado de México.

Figura 31. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado.

Figura 32. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado.

Figura 33. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado.

Figura 34. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios de Hidalgo.

Figura 35. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995.

Figura 36. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001.

Figura 37. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008.

Figura 38. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 39. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Hidalgo.

Figura 40. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH.

Figura 41. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Hidalgo.

Figura 42. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 43. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH.

Figura 44. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios de Tlaxcala.

Figura 45. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995.

Figura 46. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001.

Figura 47. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008.

Figura 48. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Tlaxcala.

Figura 49. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 50. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Tlaxcala.

Figura 51. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH.

Figura 52. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento de los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 53. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento de los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH.

Figura 54. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 de los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en el Distrito Federal.

Figura 55. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 de los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en el Estado de México.

Figura 56. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 en los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en Hidalgo.

Figura 57. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de 1985 a 2035 en las ANP's Histórico de Coyoacán, Cerro de la Estrella y Fuentes Brotantes.

Figura 58. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de 1985 a 2035 en las ANP's Los Remedios y El Tepeyac.

Figura 59. Vegetación y uso de suelo de la Cuenca de México, 2008.

RESUMEN

La Cuenca de México ha sido el centro político y económico de la República Mexicana, lo cual ha propiciado que su población aumente rápidamente, teniendo a principios del siglo XX menos del millón de habitantes y a fines del mismo más de 18 millones, provocando desequilibrio en el balance hídrico del acuífero de la Cuenca de México, contaminación ambiental, transformación de la cobertura del suelo, entre otros.

Se espera que para el 2030 en México existan 130 millones de personas, de las cuales el 80% formará parte de la población urbana, que requerirán por lo menos 700 mil hectáreas de suelo para su asentamiento. Por lo tanto, es importante predecir las áreas vulnerables a la invasión y/o pérdida de recursos naturales por el crecimiento de los asentamientos humanos, para así desarrollar políticas que impidan o aminoren el avance de la mancha urbana.

Con la finalidad de predecir el incremento a futuro y ubicación de los asentamientos humanos, y así poder estimar las consecuencias que tendrá el avance de estos en los recursos naturales de la Cuenca de México al año 2035, en este trabajo se utilizó el modelo SLEUTH, pues permite llevar a cabo una predicción a escala regional, proyectando diferentes escenarios al incorporar niveles de protección para distintas áreas.

Se generaron dos escenarios de crecimiento urbano, el E1 que considera como zonas de exclusión (áreas donde no se puede dar el crecimiento) los cuerpos de agua y las zonas con políticas de conservación y protección, de acuerdo a los ordenamientos ecológicos territoriales de los estados que conforman la cuenca; y el E2 donde únicamente se tomaron como áreas de exclusión los cuerpos de agua.

Los resultados muestran que al año 2008 el 19.54% de la Cuenca de México ha sido cubierta por los asentamientos humanos, concentrándose en el Distrito Federal, Estado de México e Hidalgo, afectando a los Parques Nacionales Fuentes Brotantes de Tlalpan, Histórico de Coyoacán, Cerro de la Estrella, Los Remedios, Lomas de Padierna, El Tepeyac y Sacromonte.

Al año 2020 las restricciones impuestas por los OET's no son una limitante en el crecimiento de los asentamientos humanos, dándose principalmente en el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal, afectando las zonas con uso agropecuario, matorrales y bosques.

Al año 2035 la política ambiental sí es un factor que limite el crecimiento de los asentamientos humanos. De no seguirse, estos ocuparán el 27.2% de la cuenca, dándose principalmente en el Estado de México, Distrito Federal e Hidalgo, afectando los Parques Nacionales Cerro de la Estrella, Los Remedios, El Tepeyac, Sacromonte y Molino de las Flores.

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca de México a lo largo de su historia, ha sido el centro político y económico de la República Mexicana (NRC *et al.*, 1995), lo cual ha propiciado que su población aumente rápidamente, teniendo a principios del siglo XX menos del millón de habitantes y a fines del mismo más de 18 millones (Gutiérrez *et al.*, 2005).

Aunque el crecimiento poblacional en la zona urbana del Distrito Federal (DF) ha disminuido actualmente, e incluso declinado a partir de los años ochenta (de un crecimiento medio anual de 4.51% en 1980 a 1.70% en 2000; Gutiérrez *et al.*, 2005), la inmigración a la Cuenca de México ó emigración a las zonas aledañas, principalmente al Estado de México, ha propiciado tanto la expansión de áreas urbanas planeadas para las clases media y alta, como las invasiones ilegales de tierra y los asentamientos no planificados en las áreas periféricas (NRC *et al.*, 1995), llegando a tener en el año 2000 una población de 18,755,578 habitantes (Gutiérrez *et al.*, 2005).

Este crecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ha provocado:

- Desequilibrio en el balance hídrico por la recarga y la extracción de agua del acuífero de la Cuenca de México (GDF, 2000; SEMARNAT, 2004).
- Contaminación ambiental, siendo la ZMCM la zona más contaminada de todo el país por la concentración industrial y por la generación de residuos sólidos producto del consumo de la ciudadanía (NRC *et al.*, 1995).
- La drástica transformación de la cobertura del suelo, ya que se calcula que en el periodo de 1993 a 2000 se perdió el 25% de la cobertura natural (SEMARNAT, 2004).

Debido a la amenaza que representa el crecimiento urbano a los ecosistemas y pobladores de la Cuenca de México, es importante predecir las áreas vulnerables a la invasión y/o pérdida de recursos naturales por este incremento, para así desarrollar políticas que impidan o aminoren el avance de la mancha urbana.

Una manera de hacerlo es por medio de los modelos de crecimiento urbano, ya que permiten predecir el incremento futuro de los asentamientos humanos y su ubicación, ayudando a estimar las probables consecuencias de las transformaciones proyectadas (Henríquez, *et al.*, 2007).

En este trabajo se usó el modelo SLEUTH (del acrónimo en inglés de los insumos que requiere: **S**lope, **L**and use, **E**xclusion, **U**rban extent, **T**ransportation y **H**illshade; Serrano, 2008). Este permite llevar a cabo una predicción del crecimiento urbano a escala regional, modelando diferentes escenarios al incorporar niveles de protección para distintas áreas (áreas de exclusión). También provee funciones tales como el desarrollo de escenarios interactivos y la habilidad de visualizar y cuantificar los resultados, volviéndose una herramienta útil para la evaluación de los impactos del crecimiento y una fuente de información en la generación de políticas (Hakan *et al.*, 2007).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Crecimiento urbano

El crecimiento urbano es la expansión espacial y demográfica de la ciudad, ya sea por extensión física territorial de la urbe, por incremento en las densidades de construcción y población o como generalmente sucede, por ambos aspectos. Ésta puede darse de forma espontánea o planificada (Mora, 2003).

Es un proceso que en los últimos años se ha incrementado. Prueba de esto es que a principios del siglo XIX se contaba menos de una docena de ciudades con más de un millón de habitantes y para finales de éste, 28 sobrepasaban los 8 millones (Graizbord, 2007).

Se espera que para 2025 haya cerca de 4 mil millones de habitantes en las ciudades, de los cuales al menos tres cuartas partes o más pertenecerán a Asia, África y América Latina (*op. cit.*).

América Latina pertenece a las regiones menos desarrolladas y de éstas es la más urbanizada, manifestando una tendencia a incrementar la proporción de población residente en grandes núcleos urbanos y sus metrópolis. Para 1980 el 27.3% de la población residía en ciudades de más de un millón de habitantes y se espera que para el año 2000 se sitúe el 40% (Caravaca *et al.*, 1993).

En México, en el año 1980 el 55.9% de la población total del país (37.4 millones de personas) habitaba en 227 ciudades, de las cuales sólo tres rebasaban el millón. Para el 2000 la población total sumaba 97.4 millones, el número de ciudades era de 364 y la población urbana alcanzó los 63.2 millones (66%; Olvera, 2005); el 40% de la población total del país (40 millones de habitantes) se encontraba concentrada en diez ciudades: Ciudad de México con cerca de 20 millones, Guadalajara y Monterrey con 4 millones cada una, Puebla con 2.5, Tijuana, Ciudad Juárez, León, Toluca, Torreón y San Luis Potosí, con poblaciones entre uno y dos millones de habitantes (Graizbord, 2006).

Para el 2030 se espera que en México existan 130 millones de personas, de las cuales el 80% formará parte de la población urbana, que requerirán por lo menos 700 mil hectáreas de suelo para su asentamiento (Zepeda, 2000 citado por Olvera, 2005).

Lo anterior es de tomarse en cuenta, ya que una de las características del crecimiento de las ciudades de países en vías de desarrollo, es que es desordenado y mal planificado, influenciado por las circunstancias que definen la cultura de esos países. Esto dificulta su planificación y puede convertirse en un obstáculo para el desarrollo, visto este último como el proceso que lleva a la obtención del bienestar social para una comunidad (Rueda y Willmer, 2007).

Una herramienta útil y ampliamente usada en países desarrollados para la planificación del desarrollo, es el modelamiento del crecimiento urbano, pero es poco aplicado a ciudades de países en vías de desarrollo (*op. cit.*).

2.2 Modelos de crecimiento urbano

El uso de modelos predictivos para la generación de escenarios futuros de cambios de uso del suelo, que emplean Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota, permite anticipar, prevenir y mitigar dinámicas insostenibles en ciudades de rápido crecimiento horizontal (Henríquez y Azócar, 2007).

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real, un proceso o una teoría, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y, posiblemente, ayudar a controlar el sistema (Ríos *et al.* citado por Rueda y Willmer, 2007). De acuerdo con el periodo de tiempo que abarquen, estos pueden ser estáticos o dinámicos (Maguire *et al.*, 2005 citado por Henríquez y Azócar, 2007).

2.2.1 Modelos Estáticos

En un modelo estático la variable tiempo no desempeña un papel relevante (MMC, 2006), es decir, los datos de entrada y salida corresponden a un mismo instante en el tiempo (Henríquez y Azócar, 2007).

Dentro de este tipo se encuentra el modelo de suelo agrícola y la teoría de oferta de renta de Von Thunen de 1826, considerado el primer modelo de uso de suelo urbano, siendo su finalidad el minimizar costos. Explicaba el decremento de la renta del suelo, el valor de la producción y la localización de diferentes usos de suelo agrícola en función de la distancia al centro del mercado (Suárez y Delgado, 2007). Los modelos que le siguieron suponían también sistemas en equilibrio y buscaban algún tipo de optimización (Serrano, 2008).

Dentro de las aportaciones que dejaron este tipo de modelos están los anillos concéntricos de Hoyt, que considera la influencia de las vías de comunicación en el direccionamiento del crecimiento, elemento que en la actualidad se aplica en todos los modelos dinámicos, pero no fue hasta 1960 que estos comenzaron a aparecer (Serrano, 2008).

2.2.2 Modelos Dinámicos

En un modelo dinámico, algunos de los elementos que intervienen en la modelación se consideran como funciones del tiempo, describiendo trayectorias temporales (MMC, 2006), por lo que los datos de salida corresponden a un tiempo diferente a los de entrada, lo que permite predecir el comportamiento futuro y prever probables consecuencias de las transformaciones proyectadas, brindando apoyo en la elaboración de proyectos, programas, planes y políticas de planificación territorial y evaluación ambiental (Henríquez y Azócar, 2007).

Existen dos tipos de modelos dinámicos, los deterministas y los estocásticos. En los primeros, tanto a los parámetros como a las variables temporales se les asignan valores determinados con certeza absoluta; en los segundos, los valores que toman a lo largo del tiempo no son determinados con certeza absoluta sino que siguen una distribución de probabilidad (MMC, 2006).

Los modelos de cambio de uso de suelo deterministas son aquellos que están basados en regresión, estableciendo relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo. Los estocásticos por su parte, se establecen a partir de la transición espacial y comprenden principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de cadenas de Markov y autómatas celulares, donde se asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central (Henríquez y Azócar, 2007).

2.2.2.1 Autómatas Celulares

Los Autómatas Celulares (AC's) surgieron como una forma de representar comportamientos complejos a partir de descripciones simples, razón por la cual se ha visto en ellos un sistema ideal para modelar fenómenos naturales (Torres y Hernández, 1994).

La investigación en el tema de Autómatas Celulares, propuestos originalmente por John Von Neumann como modelos formales de organismos auto-reproducibles (Sarkar, 2000 citado por Rueda y Willmer, 2007), se inicia en los años 60's. Su desarrollo teórico y metodológico se puede dividir en tres periodos.

La primera etapa es con el precursor John von Neumann, matemático de origen húngaro quien participa en la construcción de la primera computadora (la ENIAC en 1946). A principios de los años 50's desarrolla el análisis para describir un sistema con la capacidad de soportar sistemas complejos y de auto-reproducción. El desarrollo de esta nueva teoría es influenciada por Stanislaw Ullam, proponiendo a Von Neumann implementar su nueva teoría en un espacio celular discreto (Juárez, 2006).

La segunda etapa llega a finales de los años 60's con el autómata celular conocido como "El Juego de la Vida", propuesto por John Horton Conway en 1969 y difundido por Martin Gardner en su columna Scientific American (Fig. 1). Consta de un conjunto binario de estados, una función de transición que evalúa una celda (célula) central con respecto a la suma de sus ocho vecinos, ortogonales y diagonales, en un espacio euclidiano. De esta manera, todo el espacio es actualizado simultáneamente en cada iteración (Martínez *et al.*, 2005).

Este modelo logró captar la atención de varios investigadores, principalmente por su sistema de estructuras complejas que fueron conocidas como objetos "Life", donde destacan los gliders y los generadores de gliders (también referidos como partículas o localidades móviles) (Juárez, 2006). Otra aportación importante fue la implementación de compuertas lógicas para construir una máquina de registros, gracias a lo cual el Juego de la Vida es computable (Minsky, 1967).

La tercera etapa llega a mediados de los años 80's con Stephen Wolfram, precursor del estudio de autómata celular en una dimensión. Wolfram inicia sus investigaciones aplicando varios conceptos de dinámica no-lineal y mecánica estadística. Un dato importante, es que a diferencia de los modelos propuestos por von Neumann y Conway, donde las funciones representan números muy grandes y cada autómata tiene un propósito específico para resolver un problema, Wolfram realiza un estudio sistemático tomando un conjunto de reglas y estudia sus evoluciones, lo que lo lleva a una búsqueda por establecer una clasificación dentro de las

evoluciones de todos los autómatas de cierto grado. Dicha clasificación es conocida como las “clases de Wolfram” (Juárez, 2006).

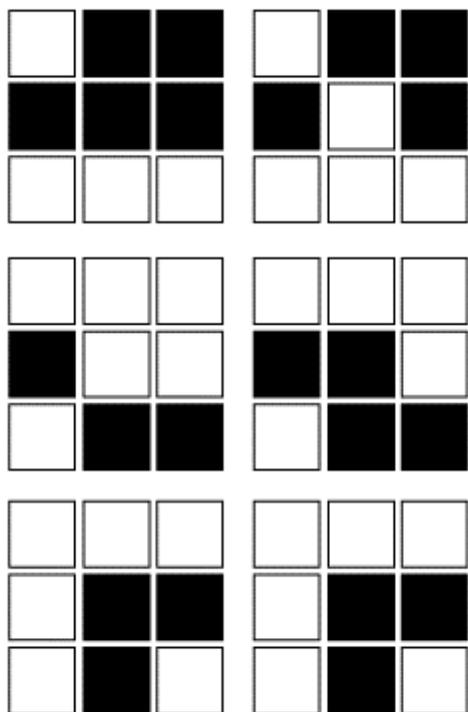


Fig. 1 Representación gráfica de las reglas del juego de la vida tomada de Fornes (2006). El juego de la vida (game life) es llamado así porque pertenece a la clase de los llamados “juegos de simulación” (que se parecen a los procesos de la vida real).

Para poder jugarlo se requiere una red de celdas, fichas y las reglas genéticas de Conway (Gardner, 1970):

1. Muertes. Cada ficha con 4 o más vecinos, muere (es eliminado de la sobrepoblación).
2. Nacimientos. Cada celda adyacente vacía con exactamente tres vecinos (no más, no menos) tiene el nacimiento de una ficha.
3. Sobrevivientes. Toda ficha con 2 o 3 fichas vecinas sobrevive para la siguiente generación.

Todos los nacimientos y muertes ocurren simultáneamente. Juntos constituyen una generación o “movimiento” en la historia de la vida completa de la configuración inicial.

Un autómata celular es un sistema dinámico discreto evolucionando en un arreglo regular infinito (Juárez, 2006), una teselación (gradícula) del espacio, en donde cada celda (célula) toma valores discretos determinados por reglas simples que se aplican a todas las celdas por igual, estas reglas simples son función de las celdas cercanas (Serrano, 2008).

La dinámica es la siguiente:

Se tiene un conjunto finito de estados (el alfabeto) y una función local afectando una cantidad de estados dentro del arreglo regular, donde cada elemento del arreglo toma un valor del conjunto de estados y es llamada celda. El arreglo regular es el espacio de evoluciones (gradícula). La función local determina el comportamiento del AC en estudio y a su vez es determinada por una celda central y sus vecinas, formando una vecindad. La vecindad es el número de argumentos que la función local recibe. Las transformaciones determinadas para cada vecindad corresponden a un elemento del conjunto de estados. Finalmente se necesita

una asignación de estados en el espacio de evoluciones que representa la configuración inicial del sistema.

Por lo tanto se puede definir formalmente a un AC como una 4-tupla $A = \langle \Sigma, u, \varphi, c_0 \rangle$ evolucionando en $d \in \mathbb{Z}^+$ dimensión, con un conjunto finito de estados Σ , una conexión local u tal que $u = \{x_{i,j}, \dots, x_{i+d,j+d}\}$, la función de transición $\varphi: u \rightarrow \Sigma$ y la condición inicial del sistema c_0 (Juárez, 2006).

Los Automatas Celulares son una metodología de apoyo y complemento a la simulación, ya que han sido implementados mostrando ventajas como:

- Simplicidad relativa en su definición, ya que poseen cuatro componentes básicos: celdas, estados, vecindad y reglas de transición (Batty, 1998 citado por Rueda y Willmer, 2007) que se presentan como una estructura interconectada (gradícula) de autómatas más sencillos (celdas), al estilo de una red neuronal. Cada celda procesa sus entradas, actualizando en el proceso su estado según una regla de transición y generando una salida para otra celda.
- Facilidad en el manejo, pues los AC operan un enfoque discreto y de fácil codificación para su solución numérica (Aguilera *et al.*, 1998 citado por Rueda y Willmer, 2007) al definir su estructura de funcionamiento básica a partir de estados que van cambiando en espacios discretos de tiempo y que además se basan en el cálculo recursivo, es decir, para ellos se cumple que estado $(t) = f(\text{estado}(t - 1))$, donde $f(x)$ es la función de transición de estado (Rueda y Willmer, 2007).
- Capacidad evolutiva ya que un AC está en constante interacción con otros, este intercambio de información y su estructura de comportamiento, especificada por la función de transición, posibilitan su metamorfosis evolutiva, haciendo que sean una alternativa para simular sistemas que no obedecen reglas estrictas, infalibles y estáticas como son los de la vida y los del desarrollo de las ciudades, que corresponden más bien a la representación de fenómenos probabilísticos y cambiantes (*op. cit.*).

2.2.2.2 Modelos de crecimiento urbano con Automatas Celulares

En la década de los 60's surgieron los primeros modelos basados en retículas rectangulares "raster" que simulaban el crecimiento de las ciudades de forma dinámica. Un ejemplo es el trabajo hecho por Chapin and Weiss en 1962 donde desarrollaron un modelo para simular el crecimiento de Greensboro, North Carolina, en el periodo 1948-1960. Para ello propusieron celdas de 300 x 300 m que tenían un estado y un potencial de cambio, la cantidad de celdas cambiadas de estado se determinaba externamente. Este modelo comenzaba con un mapa de 1948 como condición inicial y aplicaba cuatro brincos de tres años para llegar a 1960, en cada brinco de tiempo nuevas celdas eran pobladas de acuerdo a su potencial. A pesar de las limitaciones de capacidad de cómputo y resolución espacial, mostró tener buenos resultados, y la manera de medirlos también fue pionera, pues dado que el modelo incluía un factor estocástico, comparaban el promedio para 50 corridas del modelo con el mapa de la situación real para 1960 (Serrano, 2008).

Los principios anteriores fueron utilizados más tarde por White y Engelen para desarrollar lo que hoy se conoce como "Constraint CA", (autómatas celulares forzados) (*op. cit.*).

Fue hasta 1979 que el geógrafo Waldo Tobler formalizó la idea de que parte de la dinámica depende de las celdas cercanas, introduciendo así el uso de los autómatas celulares en el modelado urbano (Tobler, 1979 citado por Serrano, 2008).

Con la introducción de los “Constraint CA” se establece la dependencia a la distancia para ensamblar el potencial de cambio hacia cada uso de suelo para cada celda (Serrano, 2008).

El método consiste en establecer un potencial de cambio a cada uso de suelo para cada celda, para luego asignar estos cambios restringidos por una demanda para cada tipo de suelo a las celdas, esta demanda es establecida exógenamente, razón por la cual son llamados “AC forzados”. El potencial de cambio hacia cada uso de suelo se calcula con base a los valores de las celdas cercanas pero en vez de vecindades de More o Von Neuman usan vecindades de radio 6 (*op. cit.*).

En 1997 se incluyeron factores como red de caminos, vías de tren y cuerpos de agua, también se agregó la medida de dimensión fractal para evaluar la similitud entre dos escenarios (*op. cit.*).

Otros modelos que han aplicado AC son *Monitoring Land Use Cover Dynamics* (MOLAND) coordinado por el Instituto para el Ambiente y Sustentabilidad de la *European Commission's Joint Research Centre* y el DINAMICA. El primero tiene como objetivo proveer información actualizada, estandarizada y comparable del uso de suelo pasado, presente y futuro (Barredo, Lavallo et al., 2006 citado por Henríquez y Azocar, 2007); el segundo, simular la dinámica de cambio del paisaje en el Amazonas, en particular para analizar los patrones espaciales de cambio de uso / cobertura de suelo, producidos por los colonos en el aclareo de bosques, cultivo del suelo y eventual abandono para la sucesión de la vegetación (Soares *et al.*, 2002 citado por Henríquez y Azocar, 2007). Actualmente se ha visto que puede ser aplicado en ciudades brasileñas y otras del mundo que presenten dinámicas de crecimiento aceleradas (De Almeida *et al.*, 2005 citado por Henríquez y Azocar, 2007).

En 1997 Keith C. Clarke de la Universidad de Santa Barbara en California, publicó un artículo en el que proclama un AC automodificable para simular el crecimiento urbano de la región de la bahía de San Francisco, actualmente se denomina SLEUTH y es uno de los más usados (Serrano, 2008).

2.2.2.3 El modelo SLEUTH

SLEUTH es la conjunción de dos modelos el UGM (Urban Growth Model) y el LCD (Land Cover Deltatron). El primero es un programa generado en C que corre en UNIX, usa el compilador Standard gnu C (gcc) y puede ser ejecutado en paralelo. El segundo es incluido dentro del código del UGM por lo que puede ser llamado y manejado por éste (Clarke *et al.*, 1997).

Es llamado así por las iniciales en inglés de las capas de información que se requieren para su procesamiento: **S**lope, **L**and cover, **E**xclusion, **U**rbанизation, **T**ransportation y **H**illshade, (Serrano, 2008).

Está basado en AC por lo que usa una red de celdas de datos geográfico-espaciales históricos, para simular el crecimiento urbano y otros cambios de uso de suelo causados por la urbanización (Clarke *et al.*, 2007).

El modelo corre dos ciclos en paralelo (Clarke *et al.*, 1997.):

- Uno externo que ejecuta cada historia de crecimiento (ciclo de crecimiento; Fig. 2), reteniendo datos estadísticos y acumulativos (valores de los factores de crecimiento) resultantes de la aplicación Monte Carlo¹.
- Otro interno que desarrolla los AC a partir de las reglas y coeficientes de crecimiento, para toda la capa, por año.

Consta de dos fases principales, una de calibración y una de predicción (Fig. 3). En la de calibración cada corrida inicia con una permutación de los valores de los coeficientes, ejecutándose el número de iteraciones Monte Carlo que se especifiquen. Cuando esto se cumple, un valor de coeficiente será creado y guardado comenzándose una nueva corrida. Esto continuará hasta que todas las posibles permutaciones han sido completadas (Fig. 4; *op. cit.*).

En la de predicción, los ciclos comienzan con la ubicación de la distribución de las semillas (condiciones iniciales) del patrón de asentamiento más reciente; continúa aplicando las reglas y coeficientes de crecimiento y termina cuando el año control es alcanzado; el programa computa y salva las estadísticas descriptivas y crea imágenes del crecimiento modelado de la región (Fig. 5; *op. cit.*).

Las condiciones iniciales se definen a partir de las celdas semilla, las cuales son determinadas por la localización y datación de los asentamientos fundados, identificados en mapas históricos, atlas u otras fuentes. Los datos de entrada son cinco o seis archivos en formato gif a escala de grises. Las características de cada uno se enumeran a continuación (*op. cit.*):

- Pendiente (Slope). Determina la resistencia de la pendiente al crecimiento urbano.
- Exclusión (Exlcuded). Define las áreas que son resistentes a la urbanización o donde es imposible que ésta se de.
- Caminos (Transportation). Determina la accesibilidad a un área y por lo tanto la probabilidad del desarrollo urbano.
- Semilla (Urban). Es la base para conducir al AC del crecimiento urbano.
- Sombreado (Hillshade). Usada para darle un contexto de relieve a los escenarios predichos.
- Uso de suelo (Land cover). Esta puede o no usarse y representa diferentes clases de cobertura del suelo.

¹ El método “Monte Carlo” es usado par simular sistemas físicos y matemáticos complejos (SCCT, 2009), fue creado en el Laboratorio Nacional Los Alamos durante el Proyecto Manhattan y nombrado así en 1946 por el matemático Stanislaw Ulam. El primer cálculo se realizó en 1948 con ENIAC, la primera computadora electrónica digital. Éste utiliza secuencias de números al azar para generar simulaciones computacionales. Todas las simulaciones están basadas en eventos que se dan de forma azarosa (Brooks, 2004), en otras palabras, da la probabilidad p de que un evento ocurra en ciertas condiciones generadas por un programa repetidamente (SCCT, 2009)

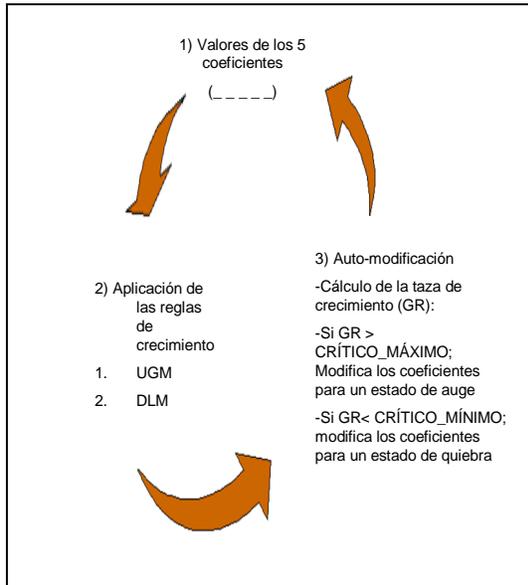


Fig. 2. Ciclo de crecimiento, la unidad básica del modelo SLEUTH. Tomado de USGS (2003).

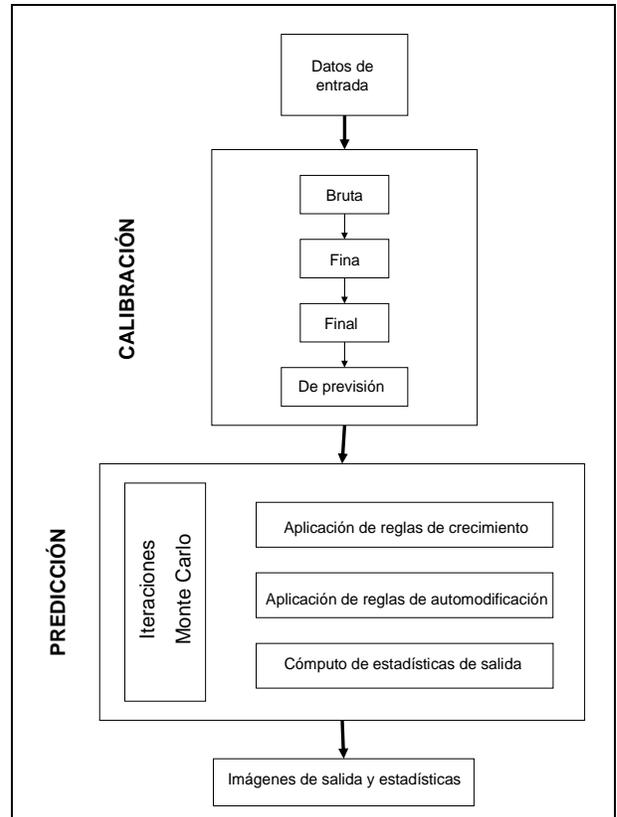


Fig. 3. Fases del modelo SLEUTH, tomado y modificado de Oğuz (2004) y Goldstein (2004).

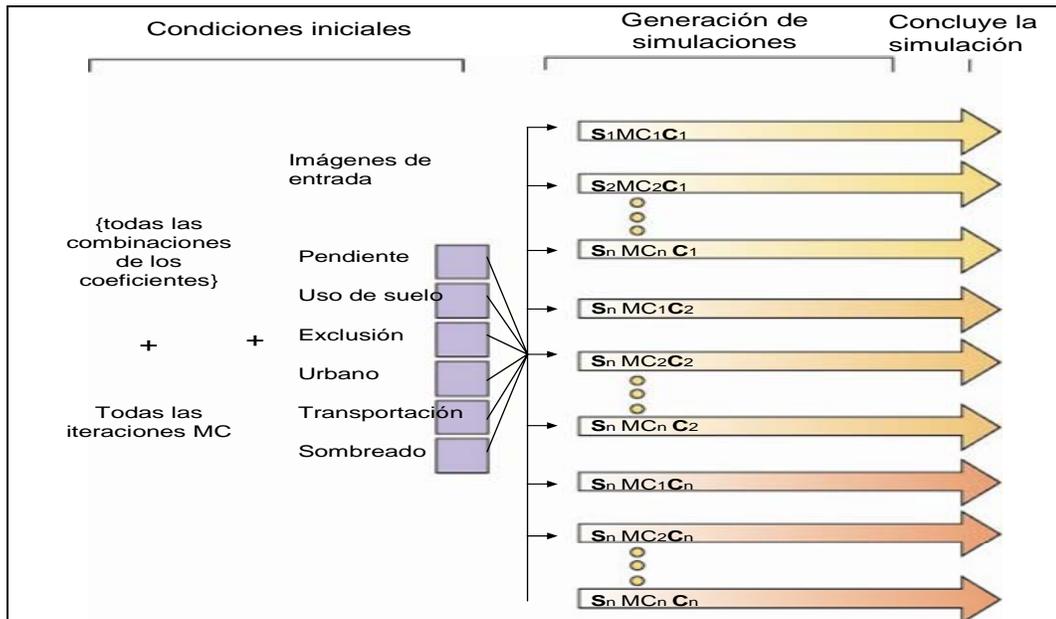


Fig. 4. Diagrama de flujo de una de calibración tomado de USGS (2003).

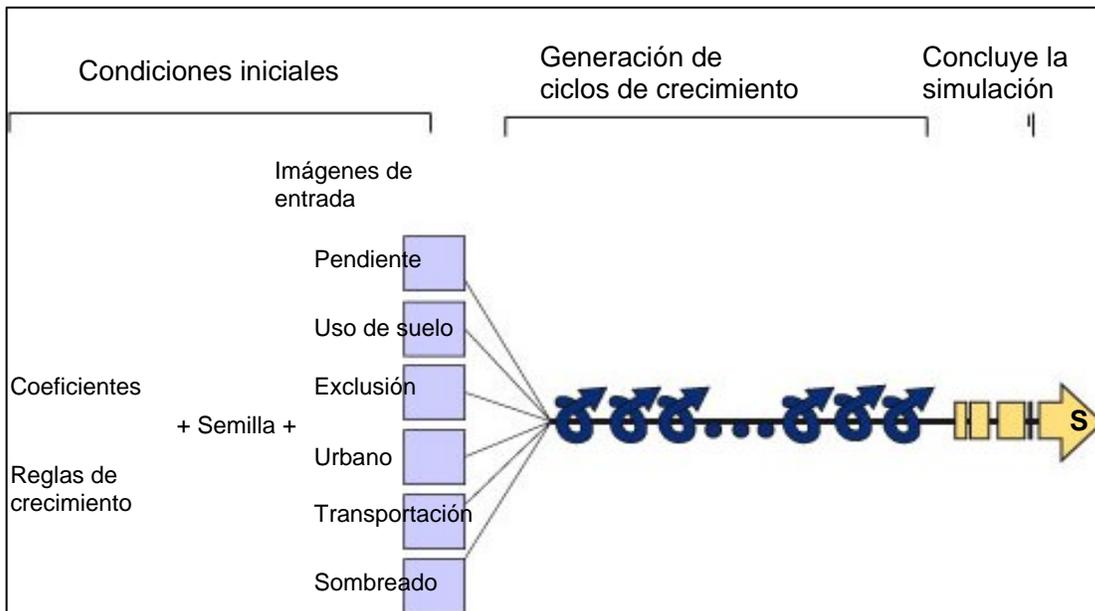


Fig. 5. Diagrama general del proceso de predicción, tomado de USGS (2003).

SLEUTH usa cuatro reglas de crecimiento que definen la dinámica en que se da (Clarke *et al.*, 1997; USGS, 2003):

1. Crecimiento espontáneo. Define la aparición azarosa de la urbanización, es decir, la probabilidad de que cualquier célula no urbanizada llegue a serlo en cualquier tiempo. La probabilidad global de que esto se de, es determinada por el coeficiente de reproducción y la local por el factor de pendiente. Si la célula está o no urbanizada, ésta no cambia y su capacidad de transición depende de su valor actual.
2. Nuevo centro de dispersión. Determina si alguna de las células recientemente urbanizadas pueden llegar a ser nuevos centros de dispersión, la probabilidad de que esto suceda está dada por el coeficiente de reproducción, ocurre si tres o más células vecinas están urbanizadas y depende del factor resistencia-pendiente y de la disponibilidad de células vecinas viables para urbanizar.
3. Crecimiento de borde. Define la parte del crecimiento que se deriva de los centros de dispersión. Este crecimiento se propaga de los generados en la regla 2. Si una celda no urbanizada tiene al menos tres vecinas urbanizadas, esta tiene una cierta probabilidad global de ser urbanizada la cual está dada por el coeficiente de reproducción.
4. Crecimiento por influencia de caminos. Es determinada por la infraestructura de transporte terrestre existente y por la urbanización que se desarrolló de las reglas 1, 2 y 3. Si un camino es encontrado dentro de un radio máximo (determinado por el coeficiente de caminos-gravedad) de una celda seleccionada (la probabilidad de ser seleccionada está dada por el coeficiente de reproducción), una celda urbana temporal se coloca en el punto del camino más cercano a la seleccionada. Después, ésta lleva a cabo una "caminata" al azar a lo largo del camino (o caminos conectados al original) donde el número de pasos es determinado por el coeficiente de dispersión. Su ubicación final es considerada como un nuevo núcleo de propagación urbana. Si una o

varias celdas vecinas de ésta (sobre el camino) es propensa a urbanización, se urbaniza. Cada “caminata” es llamada “viaje en carretera” y el número de veces que se repite en cada ciclo de crecimiento está dado por el coeficiente de reproducción.

Cinco factores o coeficientes controlan el desarrollo del sistema (Clarke *et al.*, 1997):

- Difusión o dispersión (diffusion). Determina la dispersión general de la distribución de la red de celdas y el movimiento hacia el exterior de los nuevos asentamientos a través del sistema de caminos.
- Coeficiente de reproducción (breed). Determina la probabilidad de separación de un asentamiento recientemente generado para comenzar su propio ciclo de crecimiento.
- Coeficiente de propagación (spread). Controla qué tan normalmente tiene lugar en el sistema, la expansión “orgánica” hacia el exterior.
- Factor resistencia-pendiente (slope). Influye en la probabilidad de que se den los asentamientos de acuerdo al porcentaje de pendiente.
- Factor caminos-gravedad (road-gravity). Tiene el efecto de atraer a nuevos asentamientos si caen a determinada distancia de los caminos existentes.

Los valores de estos factores son en principio establecidos por el usuario, teniendo los de difusión, reproducción, propagación y resistencia-pendiente un rango entre 0-100 y el de caminos-gravedad 0-20. Los finales se definen a partir de un proceso de calibración (*op. cit.*).

El proceso de calibración (Fig 4) se lleva a cabo en cuatro etapas: bruta, fina, final y de predicción (Fig.3) en las cuales se va reduciendo el rango de los valores y en su caso, se puede aumentar la resolución de los datos (USGS, 2003).

- Bruta: el rango de los valores (0-100) de los 5 coeficientes se establece en grandes intervalos (e. g. coeficiente = {0, 25, 50, 75, 100}; Fig. 6) y la resolución de los datos a un cuarto de su tamaño completo.
- Fina: una vez hecha la calibración bruta, se utilizan el número más alto y bajo de las primeras 3 corridas con los valores más altos en el índice Lee-Sallee² (en caso de haber empate, se toma la que sigue hasta que sean diferentes). El primero marcará el inicio de la corrida y el segundo el término de la misma. El intervalo se establecerá procurando que haya de 4 a 5 repeticiones (e. g. si el rango es de 0-20, los valores serán: coeficiente = {0, 5, 10, 15, 20}).
- Final: se extraen los coeficientes a partir del archivo de estadísticos obtenidos de la calibración fina, utilizando el mismo método y aplicándose a los datos en su resolución completa.
- De Predicción. El proceso de calibración produce los valores de los coeficientes de inicio que simulan de mejor manera el crecimiento urbano de una región. Sin embargo, debido a que SLEUTH puede automodificar sus cualidades, los valores de los coeficientes de inicio de la corrida podrían ser alterados por los de término. Para obtener el mejor resultado, se deben tener los valores de término de la mejor

² Índice Lee-Sallee o medida Lee-Sallee. Mide la correspondencia entre dos shapes (Bojorquez *et al.*, 2009). En el caso del SLEUTH, es una medida de ajuste espacial entre el modelo de crecimiento urbano y la extensión urbana conocida de los años control (USGS, 2003).

calibración. Esto se consigue corriendo SLEUTH en el periodo histórico a analizar con los valores obtenidos de la calibración final; se seleccionan tomando en cuenta la corrida más alta en el valor Lee Salle y dejando un intervalo de una sola repetición (e. g. si el valor es 3, el rango será de 3-3).

15 grupos de combinaciones posibles para los valores de los coeficientes de 3125 (5 ⁵)		
{1,1,1,1,1}	{25,25,25,25,1}	{1,1,75,1,1}
{25,1,1,1,1}	{25,25,25,25,25}	{25,25,75,25,25}
{51,1,1,1,1}	{25,25,25,25,50}	{50,50,75,50,50}
{75,1,1,1,1}	{25,25,25,25,75}	{75,75,75,75,75}
{100,1,1,1,1}	{25,25,25,25,100}	{100,100,75,100,100}

Fig. 6. Quince combinaciones de los valores de los coeficientes para las iteraciones Monte Carlo de las 3125 posibles (5 valores posibles para los 5 coeficientes). {Diff, Brd, Sprd, Slp, RG}; Diff: difusión, Brd: reproducción, Sprd: propagación, Slp: pendiente, RG: caminos-gravedad. Tomado de Goldstein (2004)

De esta última calibración, se obtienen los coeficientes promediados por año resultante de todas las iteraciones Monte Carlo de las calibraciones anteriores, que serán usados para predecir el crecimiento. Este paso es importante ya que produce un grupo de coeficientes de predicción mucho más robusto (*op. cit.*).

Los coeficientes de predicción se seleccionan de la última corrida o año de término del archivo de estadísticos obtenidos del paso anterior, se crea el escenario y corre la fase de predicción (*op. cit.*).

La predicción produce archivos de imágenes en formato tipo *.gif, mapas de probabilidad, animaciones y gráficas estadísticas del crecimiento modelado que pueden ser desplegados en un SIG para su manejo (*op. cit.*).

3. ANTECEDENTES

3.1 Crecimiento urbano en la Cuenca de México

El establecimiento de los asentamientos humanos en la cuenca se puede dividir en dos vertientes: el rural que se ha dado de forma dispersa y limitada, y el urbano y metropolitano, que han sido ilimitados y concentrados. A partir de los años 40 comienza la preponderancia del asentamiento urbano en el Distrito Federal (Cabrera, 2007).

Desde mediados del siglo XX, la Ciudad de México ha pasado por una creciente expansión urbana acompañada de un intenso incremento demográfico. Tanto ésta como su zona metropolitana han transitado por etapas de fuerte expansión física seguidas por fases de densificación, ocupando tierras agrícolas para usos urbanos (Cruz, 2002).

En 1950 la población total de la Cuenca ascendía a 3.7 millones de habitantes, de los cuales el 83% residía en el Distrito Federal. Es en esta fecha donde empieza a formarse la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) al conurbar los municipios de Naucalpan y Tlalnepantla con una población de 59 000 habitantes. El resto de la población de la Cuenca estaba alrededor de los 700 000 habitantes de los cuales el 28% pertenecía al Estado de México no conurbado. De 1960 a 1980, se incorporaron a la ZMCM 53 municipios del Estado de México sumando una población aproximada de la cuenca de 14.8 millones de personas (Cabrera, 2007).

La década de los 80's se caracteriza por presentar diferencias con respecto al patrón general de crecimiento de la ZMCM, ya que en esta época la expansión física no se dio de manera paralela al incremento de la población (Cruz, 2002), pues para 1990 esta última creció a 15.9 millones (Cabrera, 2007), mientras que no dejó de extenderse, incrementándose el área urbana un 35% (40,390 ha), descendiendo la densidad promedio a 108 hab/ha, el valor más bajo en los últimos cincuenta años (Cruz, 2002).

En el año 2000 se contabilizó un total de 18,755,578 habitantes (Gutiérrez *et al.*, 2005), de los cuales el 48.8% vivían en el Distrito Federal y el 51.2% en los municipios del Estado de México (Dávila *et al.*, 2007)

La velocidad a la que se ha dado el crecimiento de la ciudad es variada ya que de 1950 a 1970 la tasa media anual de crecimiento fue de 4.9%, de 1970 a 1980 inicia un descenso a 4.5% anual; en el decenio de 1980-1990 disminuye a 0.8% esto posiblemente por razones económicas y por el sismo de 1985, recuperándose para 1995 a 2.2% (Cabrera, 2007).

El resto de la Cuenca tiene otro ritmo de expansión, registrándose de 1950 a 1960 una tasa de crecimiento anual del 0.1%, debido a la inmigración de la población de los estados cercanos a la cuenca, al Distrito Federal y a la ZMCM. De 1960 a 1980, la tasa crece a 1.9%. A partir de 1980 se presenta el desplome del crecimiento con una tasa de -0.1% que para 1990-1995 decrece a -1.3% (*op. cit.*).

En conclusión, para 1950 el Distrito Federal concentraba el 79% de la población total de la cuenca mientras que los municipios conurbados del Estado de México apenas el 1.6%. En

1995 la cifra disminuye para el primero a 48% incrementándose para el segundo a 47%. El resto de la cuenca en 1950 reunía el 19% de la población y disminuyó a 7% para 1995 (*op. cit.*).

Lo anterior indica que, por un lado, hay una migración intensa externa a la cuenca que se dirige hacia el Distrito Federal, por el otro, hay una migración del Distrito Federal hacia los municipios conurbados del Estado de México y fuera de la Cuenca, lo que llevó a la incorporación de nuevos municipios a la ZMCM (*op. cit.*).

También se debe considerar que a partir de 1975 se implementa el Programa de Planificación Familiar que hace disminuir la fecundidad, lo cual se nota en la disminución de la tasa de crecimiento (*op. cit.*).

El crecimiento de la ciudad se ha caracterizado por el despoblamiento de las áreas centrales en delegaciones como Azcapotzalco, Gustavo A. Madero e Iztacalco, y un intenso incremento urbano hacia las del sur y municipios conurbados. Las tendencias del crecimiento de la ZMCM se orientan al norte, principalmente a Ecatepec, Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán y Naucalpan; al Oriente en los municipios de Chalco, Ixtapaluca y Chimalhuacán y al sur, destacando las delegaciones Iztapalapa, Xochimilco, Tlalpan y Álvaro Obregón (Cruz, 2002).

El crecimiento del área urbana no se ha dado de manera continua, es decir no se da exclusivamente alrededor de, sino que presenta una urbanización dispersa, en la que destaca la de los pueblos conurbados y las zonas rurales, esto se puede deber a las llamadas “combis urbanizadoras” las cuales permiten la comunicación entre estas áreas, facilitando el desdoblamiento de las mismas (Cruz, 2000).

Según una proyección hecha por el Consejo Nacional de Población, de 1995 a 2010 se prevé un incremento de 3.6 millones de habitantes; la ZMCM conservará el 94.6% de la población en 2010 (aproximadamente 21 millones de habitantes). En el Distrito Federal disminuirá a 42% y en los municipios conurbados del Estado de México aumentará a 52.2%. El resto de la cuenca permanece con 5.4% de la población total (Cabrera, 2007).

Para el 2020 se espera que el crecimiento urbano en la ZMCM continúe, concentrándose en los municipios conurbados del Estado de México, en particular la región oriente, incorporándose el suelo ejidal e la mancha urbana (Lazcano, 2005).

3.2 Problemática

El crecimiento antes mencionado ha ocasionado problemas ambientales como:

- **Desequilibrio en el balance entre la recarga y la extracción de agua del acuífero.** El consumo de agua varía de 60-93 m³/s, de los cuales 20 m³ provienen del sistema Lerma-Cutzamala del Estado de México y el resto se obtiene de pozos de los acuíferos de la propia Cuenca de México. Se estima una sobreexplotación de 47 m³/s, lo que ha provocado un hundimiento de la Ciudad de México de alrededor de 9 m en lo que va del siglo XX, siendo el área con mayor depresión la Alameda Central. Aunado a esto, existe el pronóstico de una posible crisis dentro de 25 años, debido al agotamiento de los acuíferos y/o su contaminación (Cabrera, 2007), siendo las entidades más propensas a contaminación del agua subterránea Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero, Naucalpan, Coyoacán, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Ecatepec y Tlalnepantla (Soto *et al.*, 2000). Para toda la cuenca se calcula que la sobreexplotación del recurso excede 140% la magnitud de recarga (Guido, 2003 citado por Breceda, 2004).
- **Contaminación ambiental.** La ZMCM es la más contaminada de todo el país al albergar 30 000 empresas industriales, de las cuales sólo un número muy bajo usan equipo anticontaminante. Otro factor que la provoca es el parque automovilístico, el cual sumaba 3 millones de automóviles en el 2000, muchos de ellos modelos anteriores a 1982. El contenido de plomo en el aire rebasa la norma, en algunas zonas de la ciudad, en más de 94% (Cabrera, 2007),
- **La rápida transformación de la cobertura del suelo.** Se calcula que en el periodo de 1993 a 2000 se perdió el 25% de la cobertura natural (SEMARNAT, 2004), lo que ha ocasionado la desaparición de especies de flora y fauna silvestre y de ecosistemas que, por su estructura y función, desempeñan un papel preponderante en el mantenimiento de los bienes y servicios ambientales (GDF, 2000; SEMARNAT, 2004) como es el caso de las zonas de recargas de acuíferos, en especial la Sierra Nevada, la Sierra Chichinautzin, la Sierra del Ajusco y la Sierra de las Cruces (SEMARNAT, 2004).

A lo anterior se puede agregar la generación de basura, la cual se calcula en 12 000 toneladas diarias de procedencia doméstica más 600 de residuos biomédicos (SEMARNAT, 2004)

4. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento urbano de 1950 a la actualidad se ha dado sin planeación, amenazando la permanencia de los ecosistemas naturales y por tanto la provisión de bienes y servicios ambientales a los pobladores de la Cuenca de México. Para proteger estos ambientes es necesario identificar las áreas vulnerables a la urbanización y/o pérdida de recursos naturales, para así establecer lineamientos que restrinjan el crecimiento en estas zonas, asegurando su permanencia.

5. OBJETIVOS

- Predecir las áreas que ocuparán los asentamientos humanos en la Cuenca de México.
- Determinar la pérdida de cobertura vegetal y áreas de conservación y protección debida al incremento de los asentamientos humanos.
- Cuantificar la superficie de los asentamientos humanos en diferentes periodos y su evolución.
- Evaluar el efecto de los Ordenamientos Ecológicos Territoriales en el crecimiento de los asentamientos humanos.

6. LA CUENCA DE MÉXICO

6.1 Situación geográfica

La Comisión Nacional del Agua (CNA), con la finalidad de llevar a cabo un manejo sustentable de este líquido, dividió al país en 13 regiones administrativas, siendo la número XIII en la que se encuentra el área de estudio de esta investigación (CNA, 2008).

La Región XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala se ubica dentro de la Región hidrológica No. 26 Alto Pánuco. Su superficie es de 16 150 km², sin embargo los límites administrativos de la región cubren una superficie de 17 126 km², de los cuales 6 557 corresponden a la del Río Tula y 9 835km² a la subcuenca del Valle de México, teniendo jurisdicción política en esta última el Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala y el Distrito Federal (Treviño, 2005).

Debido a que la región XIII se estableció con fines administrativos, en este trabajo se utilizó como área de estudio la cuenca delimitada por Bojórquez *et al.* (2009), ya que se trazó a partir de las divisorias de aguas obtenidas de las curvas de nivel 1:50 000 de INEGI, por lo que, tanto la superficie como los estados que abarca esta cuenca, difieren de los de la región XIII.

La cuenca de estudio tiene una extensión de 9,438 km² ocupando (Fig. 7 y 8):

- Distrito Federal. Sus 16 delegaciones sumando un área de 1,290.957 km².
- Estado de México. 63 municipios, (19 de forma parcial en la cuenca), ocupando una superficie de 4,897.095 km².
- Hidalgo. 20 municipios, (10 de forma parcial) con una extensión de 2,557.562 km².
- Tlaxcala. 8 municipios (3 de forma parcial) en un área de 789.575 km².
- Puebla. 2 municipios (1 de forma parcial) con una superficie de 85.131 km².

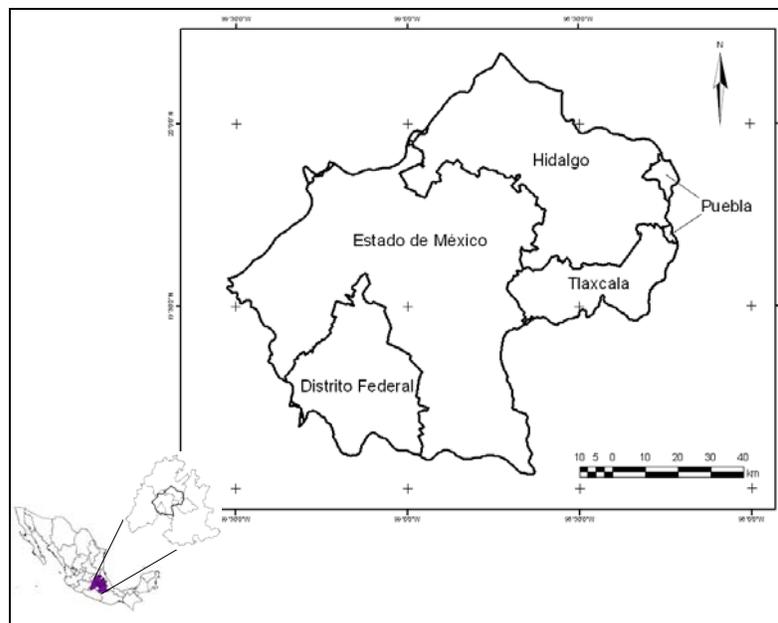


Fig. 7. Ubicación de la Cuenca de México.

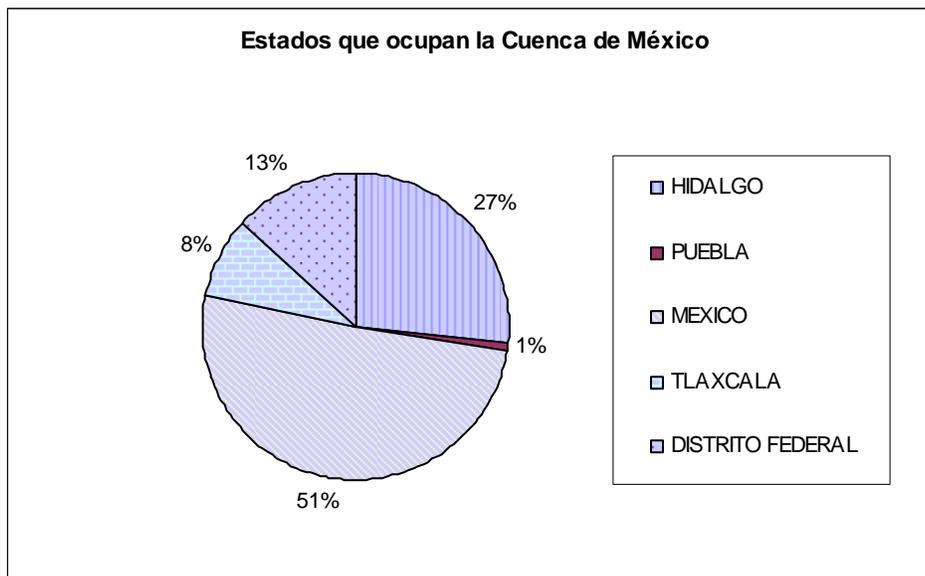


Fig. 8. Porcentaje de ocupación de los estados en la Cuenca de México.

La Cuenca de México es endorréica (con desagüe artificial al norte en la actualidad) es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas de edad plio-cuatemaria que se localizan en la parte centro-oriente del Sistema Volcánico Transversal, entre los meridianos 98° 15'- 99° 30' y los paralelos 19° 00' - 20° 15'. Su altitud varía de 2,240 m en el sur, a 2,390 m al norte; su longitud máxima, de norte a sur es de 110 km y la mínima, de este a oeste, de 80 km (Gutiérrez *et al.* 2005). Se encuentra delimitada al norte por la Sierras de Pachuca, Chiconautla y Tepozán; al noroeste por las sierras de Tepotzotlán-Tezontlalpan; al este por la Sierra de Río Frío y por la Sierra Nevada; al oeste por el Volcán Ajusco y la Sierra de Las Cruces; al sur por la Sierra de Chichinautzin que se une al suroeste con la Sierra de Zempoala (Fig. 9; de Cserna *et al.*, 1988 citado por Gutiérrez *et al.*, 2005). De las sierras que la rodean, la mayor es la Sierra Nevada (al SW), donde se encuentran los volcanes Popocatepetl (5,430 msnm) e Iztaccíhuatl (5,286 msnm).

6.2 Origen de la Cuenca de México

La Cuenca de México se creó al cerrarse el antiguo valle de México en el sur por la formación de la Sierra del Chichinautzin (Fig. 9); es el resultado de procesos volcánicos y tectónicos que se han dado desde el Eoceno (Mooser, 1963 y Demant y Robin, 1975 citados por Tapia y López, 2002; Gutiérrez *et al.*, 2005).

Durante el Mioceno aparece la Sierra de Guadalupe y la de Tepoztlán, Los Pitos, Patlachique y El Tepozán (Gutiérrez *et al.*, 2005). Al final de esta época comienza la formación de las sierras mayores: al oeste la de las Cruces-Monte Alto-Monte Bajo y al este la Nevada-Río Frío que en conjunto definen los límites de la Cuenca (Gutiérrez *et al.*, 2005; Tapia y López, 2002; Fig. 9).

En el Cuaternario se formaron los cerros (volcanes) Chimalhuacán, La Estrella, Los Pinos, Peñón del Marquez, Chiconautla y Gordo (Gutiérrez *et al.*, 2005).

La Serie Volcánica Antigua (SVA), comienza su formación hace 2.84 o 0.3 millones de años y la Joven (SVJ) hace 0.6 millones de años (Tapia y López, 2002).

En el Cuaternario continúa el vulcanismo, alcanzando su máximo desarrollo la Sierra Nevada y la del Chichinautzin (Vázquez y Palomera, 1989 citados por Tapia y López, 2002). También se forma la zona oriente y nororiente de Tizayuca-Atzompa-Texcoco hasta Ciudad Sahagún-Singuilucan, al norte y nororiente de Apan, Hidalgo (Ledezma-Guerrero, 1985 citado por Tapia y López, 2002; Fig. 9).

6.3 Geología

En la superficie de la cuenca afloran rocas volcánicas y sus derivadas, la mayoría clasificadas como del Plioceno-Cuaternario. También se encuentran rocas oligocénicas y miocénicas aunque en menor proporción (de Cserna *et al.*, 1988; Vázquez y Jaimes, 1989; Mooser *et al.*, 1996 citados por Zamorano *et al.*, 2002).

Existen afloramientos de rocas sedimentarias cretácicas (Vázquez y Jaimes, 1989 citados por Zamorano *et al.*, 2002).

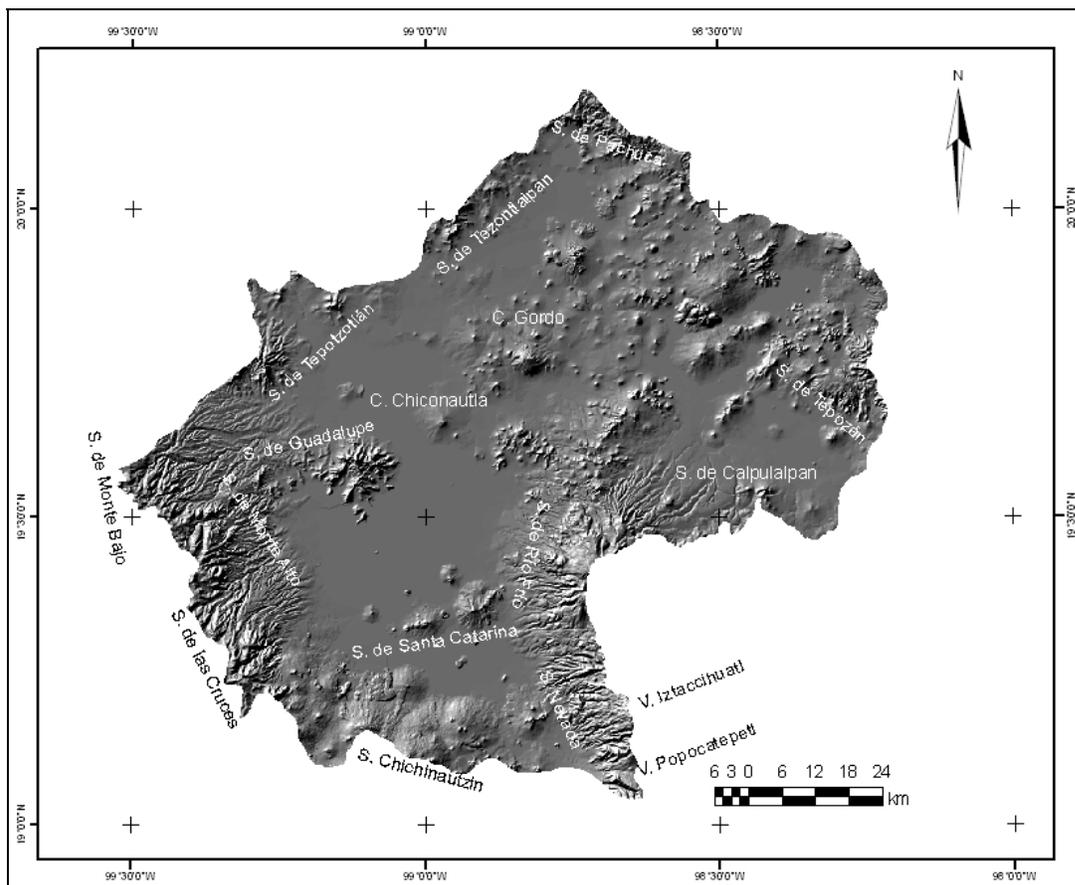


Fig. 9. Sierras de la Cuenca de México

6.4 Geomorfología

La cuenca de México ha sido dividida en cuatro unidades de relieve (Gutiérrez *et al.* 2005):

1. Relieve montañoso

Es de origen volcánico. Las elevaciones mayores definieron el parteaguas, las menores se desarrollaron al interior de la misma, creando prominencias aisladas (cerros) y pequeñas sierras que interrumpen la continuidad de la planicie.

2. Piedemonte

Es una superficie inclinada marginal a las cadenas montañosas que definen los límites de la Cuenca, el de mayor desarrollo se asocia a las sierras de Las Cruces y Nevada.

3. Planicies proluviales lacustres

Son una superficie de transición entre el piedemonte y la planicie lacustre. Presentan pendientes menores a los cinco grados. La mayor parte de éstas están urbanizadas o en proceso de ocupación por el hombre.

4. Planicie lacustre

Ocupa el nivel altitudinal más bajo de la Cuenca, con una pendiente inferior a los cuatro grados de inclinación y una altitud promedio de 2,240 m.

6.5 Clima

Los climas con mayor cobertura en el área son, el Templado Semiseco localizado en las partes bajas (planicie lacustre de Texcoco) con una temperatura media anual de 14°C a 18°C; el Templado Subhúmedo localizado en las planicies aluviales, en las porciones inferiores extremas de los piedemontes con una temperatura media anual de 12°C a 16°C y el Muy Frío localizado en la cumbre del volcán Iztaccíhuatl; donde la temperatura media anual es inferior a los -2°C, y en el mes más cálido inferior a 0°C (García 1988; SFP 1993; Guillén-Guerrero 1996 citados por Tapia y López, 2002).

6.6 Hidrología

En el año 1521, el sistema lacustre de la Cuenca de México contaba con una extensión de 1,575 km² (Carrera, 2000), integrado por los lagos: Tzompanco, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco (Ezcurra, 1996).

Para el año 2003, la superficie ocupada por lagos era de 13 km² (Carrera, 2000; Breña y Breña, 2004), repartida mayoritariamente entre los lagos de Texcoco y Zumpango pues los de Chalco, Xaltocan y San Cristóbal, permanecen secos casi todo el año y el de Xochimilco se mantiene artificialmente a base de canales. Esta disminución se debe a las obras hechas por el hombre (drenaje de los lagos, bombeo del subsuelo y deforestación; Carrera, 2000).

6.7 Edafología

Los tipos de suelo que se encuentran en la cuenca de acuerdo con INIFAP Y CONABIO (1995), son los Andosol húmico; Cambisol cálcico, crómico, éutrico y húmico; Feozem calcárico, háplico y lúvico; Fluvisol dístico y éutrico; Gleysol mólico; Histosol éutrico; Litosol; Luvisol crómico, órtico y vértico; Planosol mólico; Regosol calcárico, dístico y éutrico; Solonchak glégyco, mólico y órtico; y Vertisol crómico y pélico

6.8 Vegetación

Rzedowski (1975) citado por Ezcurra (1996) reconoce diez tipos de vegetación para la Cuenca de México:

Bosque de oyamel. Los oyameles (*Abies religiosa*) se desarrollan entre los 2,700 y los 3,500 m de altitud, generalmente en las serranías de la parte meridional de la cuenca, donde las condiciones de humedad son más favorables. Es un bosque perennifolio, de 20 a 40 m de altura, densamente sombreado en el sotobosque. Además del oyamel, son elementos importantes los ailes (*Alnus firmifolia*), los cedros blancos (*Cupressus lindleyi*), los encinos (*Quercus laurina*), los romerillos (*Pseudotsuga macrolepis*), los sauces (*Salix oxylepis*) y los capulines (*Prunus serotina* sp. *capuli*). La cubierta herbácea del sotobosque, es escasa en este tipo de vegetación, y dominan en ella los musgos y varias plantas de sombra.

Bosque mesófilo de montaña. El bosque mesófilo forma una comunidad que ocupa no más de 2 km² en toda la región. Se desarrolla sobre cañadas y laderas protegidas de los declives inferiores del Iztaccíhuatl y de la Sierra de las Cruces, entre los 2,500 y los 3,000 m de altitud. Su característica más importante es la abundancia de epífitas, sobre todo musgos, helechos y las trepadoras leñosas que cubren buena parte de los troncos y ramas de los árboles. Entre las especies arbóreas más importantes del bosque mesófilo se encuentran el tlecuáhuatl (*Clethra mexicana*), el encino (*Quercus laurina*), y el limoncillo (*Ilex tolucana*).

Bosque de pino. Los pinares (*Pinus* spp.) crecen entre los 2,350 y los 4,000 m de altitud, con lluvias anuales entre 700 y 1,200 mm. A lo largo del gradiente altitudinal, los pinares más bajos son los de *Pinus leiophylla*, que crecen con frecuencia asociadas a encinares, formando bosques ralos. En la actualidad han disminuido por el crecimiento de la ciudad. Entre 2,500 y 3,100 m, se encuentran bosques de ocote (*Pinus montezumae*) en la parte sur de la cuenca y bosques de *Pinus rudis* en las montañas más secas del norte y del este. Por encima de los 3,000 m crecen bosques ralos de *Pinus hartwegii*, la especie más tolerante a las condiciones ambientales extremas que imponen las altas montañas que rodean la cuenca. Este pino se desarrolla acompañado de pastos amacollados, conocidos como zacatones, del género *Festuca* y *Muhlenbergia*.

Bosque de encinos. Los bosques de encinos (*Quercus* spp.) son formaciones comunes en la cuenca de México entre los 2,300 y los 3,000 m, con lluvias de 700 a 1,200 mm anuales. El ambiente en que se desarrollan es muy parecido al que ocupan los bosques de pinos y con frecuencia, ambos géneros crecen juntos formando comunidades mixtas. Al igual que los

pinos, existe un número grande de especies de encinos en la cuenca de México. Los encinares son bosques más bien bajos, de 5 a 12 m de altura, y generalmente forman bosques densos en el piso altitudinal inmediatamente inferior al de los pinos. Por debajo de los 2,500 m dominan *Quercus obtusata* y *Q. laeta*; entre los 2,500 y los 2,800 m domina *Q. rugosa*, una especie de encino de hojas anchas y rígidas, asociado a veces con el madroño (*Arbutus xalapensis*) y con *Q. mexicana* y *Q. crassipes*. Por encima de los 2,800 m domina *Q. laurina*, comúnmente asociado a los bosques de oyamel y de pino. Al norte de la cuenca, en las partes más secas, son comunes los bosques bajos de *Q. microphylla* y de *Q. gregii*. Un gran bosque de encinos dominado por *Quercus rugosa* ocupaba las partes medias del Pedregal de San Ángel, al sur de la delegación Tlalpan. Actualmente ha desaparecido casi totalmente por el avance de los fraccionamientos urbanos.

Bosque de enebros. Los enebros o juníperos (*Juniperus spp.*) son arbustos o árboles de poca altura (menos de 6 m), que forman bosques bajos y ralos con abundante vegetación herbácea. Estos bosques son comunes en las partes norte, este y noreste de la cuenca, entre los 2,400 y los 2,800 m de altitud. Se desarrollan sobre laderas o planicies semiáridas, con lluvias anuales entre 600 y 800 mm. La especie dominante es el enebro, junípero o sabino (*Juniperus deppeana*), un árbol de alrededor de 4 m de alto, con tallos verdes y hojas pequeñas y escamosas. El bosque de enebros es, en muchos casos, una comunidad vegetal inducida por la destrucción de bosques más altos de pinos o de encinos.

Matorral de encinos. Esta comunidad está formada por matorrales de encino chaparro (*Quercus microphylla*), el cual se multiplica vegetativamente a través de sus partes subterráneas y forma una cubierta densa de arbustos bajos (40 a 80cm de altura). Junto con el encino, conviven frecuentemente la palmita (*Nolina parviflora*) y el sotol (*Dasylyrion acrotriche*). Los matorrales de encinos chaparros se encuentran sobre todo al noreste de la cuenca, en áreas semiáridas con 700 a 900 mm de lluvia anual media. Al igual que la comunidad anterior, existe evidencia de que el matorral de encinos en la cuenca de México es una comunidad inducida por la acción humana sobre áreas antiguamente ocupadas por bosques de pinos y de encinos. El elemento que induce y mantiene estos matorrales son los incendios periódicos.

Pastizales. Existen comunidades de pastizales en varias partes de la cuenca de México. La formación más importante son los pastizales de *Hilaria cenchroides*, comunes al noroeste de la cuenca en Huehuetoca y Tepoztlán, y que también se pueden observar al pie de la Sierra Nevada.

Esta comunidad prospera en laderas y lomeríos entre 2,300 y 2,700 m de altitud, con precipitaciones anuales entre 600 y 700 mm. En las planicies del centro y norte de la cuenca, a 2,300 y 2,400 m de altitud y sobre áreas fuertemente perturbadas, se desarrolla una comunidad de pastizal en la que dominan gramíneas anuales (*Aristida adscencionis* y *Bouteloua simplex*), acompañadas a veces por árboles espaciados de pirú (*Schinus molle*) y algunos nopales (*Opuntia spp.*). Esta comunidad puede observarse típicamente en los alrededores de Teotihuacan y al norte, hacia Pachuca.

A mucha mayor altitud (2,900 a 3,500 m), en los bosques de oyamel, se encuentran con frecuencia praderas de sínfito (*Potentilla candidans*) en valles y planicies altos de suelo arcilloso y lento drenaje. En la época seca dominan en esta comunidad las plantas rastreras de sínfito, con vistosas flores amarillas. Durante el tiempo de lluvias, en cambio, estos valles se cubren con un denso tapiz de gramíneas y cipéraceas. A una altura aún mayor (4,000 msnm o más), por encima del bosque de *Pinus hartwegii*, se desarrollan los pastizales alpinos de *Muhlenbergia* y *Festuca*. Estos pastos o zacatonales de crecimiento amacollado, forman matas erectas de 60 a 120 cm de altura. Son muy susceptibles a los incendios y al igual que la comunidad de *Pinus hartwegii*, son el hábitat preferido del conejo de los volcanes.

Matorrales xerófilos. Son frecuentes en la parte norte de la cuenca, donde la precipitación media anual es inferior a los 700 mm, pero también ocurren en la parte meridional, sobre afloramientos rocosos y pedregales. En general ocupan partes bajas de la cuenca, entre 2,250 y 2,700 m de altitud.

La asociación vegetal más extensa dentro de este tipo de vegetación la forman las nopaleras del norte de la cuenca, en las que domina el nopal (*Opuntia streptacantha*), la uña de gato (*Mimosa biuncifera*), la palma (*Yucca filifera*) y la cenicilla (*Zaluzania augusta*). En algunas laderas del norte de la cuenca prospera el matorral de guapilla (*Hechtia podantha*) en el que dominan plantas con hojas en roseta, como la misma guapilla y la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), junto con arbustos deciduos como la sangre de drago (*Jatropha dioica*) y la uña de gato.

En la Sierra de Guadalupe, en el centro de la cuenca, quedan todavía algunos restos del matorral de palo dulce (*Eisenhardtia polystachya*), una formación xerófila que está desapareciendo rápidamente por la presión del crecimiento urbano. Finalmente, al sur de la cuenca, en la parte más baja del Pedregal de San Ángel, dominaba un tipo de vegetación conocido como matorral de palo loco (*Senecio praecox*), en el que la especie característica crece junto con los tepozanes (*Buddleja* spp.), el tabaquillo (*Wigandia urens*), los copales (*Bursera* spp.), el palo dulce, el pirú, y un número grande de especies herbáceas, muchas de ellas endémicas del Pedregal. Esta importante comunidad vegetal ocupaba algo más de 40 km² a principios de los años cincuenta. El avance de los fraccionamientos la ha reducido actualmente a menos de 3 km². La vegetación del Pedregal de San Ángel sobrevive fundamentalmente en los terrenos de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se ha creado una reserva ecológica para protegerla.

Vegetación halófila. Es común en el lecho seco del antiguo Lago de Texcoco, una depresión que se encontraba cubierta por aguas salobres. Antiguamente este tipo de vegetación ocupaba sólo las márgenes salobres del lago, pero con el desarrollo del drenaje de la cuenca y el secado artificial de los espejos de agua, se ha extendido hacia las partes más bajas. La vegetación salina se encuentra en parte amenazada por el crecimiento urbano, pero sobre todo por las descargas de aguas negras de la ciudad.

Las comunidades salinas de la cuenca de México presentan una fisonomía de pastizal bajo y denso, dominadas por dos gramíneas que se multiplican por estolones (*Distichlis spicata* y *Eragrostis obtusiflora*). También se encuentran arbustos bajos como el chamizo (*Atriplex* spp.) y el romerito (*Suaeda nigra*).

Vegetación acuática. Las plantas acuáticas ocupaban antiguamente grandes extensiones de la cuenca de México; el secado de los lagos ha reducido su extensión. La vegetación acuática que todavía puede verse en la cuenca se encuentra en el Vaso de Texcoco, en el Lago de Zumpango, en las chinampas de Xochimilco, y en las partes más bajas de lo que era el Lago de Chalco. En Texcoco y Zumpango pueden observarse tulares, dominados por *Typha latifolia* (el tule) y *Scirpus validus*. Finalmente, las lentejillas de agua (*Lemna sp.* y *Azolla sp.*) formaban comunidades flotantes en las partes en que los espejos de agua estaban más tranquilos. Actualmente, los pocos cuerpos de agua libre que se encuentran en la cuenca han sido invadidos por una especie introducida de Sudamérica, el huachinango o lirio de agua (*Eichhornia crassipes*), que se propaga vegetativamente llegando a cubrir totalmente los cuerpos de agua, modificando sus condiciones de aireación e iluminación y produciendo serios trastornos sobre los ciclos de vida de la flora y fauna nativas.

7. MÉTODOS

Para predecir el crecimiento de los asentamientos humanos se empleó el modelo SLEUTH el cual requiere cinco tipos de información: Distribución del área urbana (de cuatro fechas diferentes), Vías de transporte terrestre (de dos años diferentes), Zonas de Exclusión (donde no puede haber crecimiento urbano), Pendiente del terreno en porcentaje y Sombreado.

7.1 Definición del área de estudio

Como ya se mencionó (6.1), el área utilizada fue la generada por Bojórquez *et al.* (2009). A este polígono se le hizo un buffer de 5 km para estimar la influencia en el crecimiento de los asentamientos humanos de los poblados que se encuentran fuera de la cuenca, quedando una superficie de 12,185.68 km². Sin embargo los resultados se presentan únicamente para el área de estudio.

7.2 Generación de las capas para SLEUTH

El modelo requiere todos los archivos en escala de grises tipo *.gif derivadas de grids en la misma proyección, extensión y resolución (# de columnas x # de renglones) y con una nomenclatura específica (ubicación.capa de información.fecha.gif).

Para asegurarse de que se cumplieran las primeras tres condiciones, todas las capas se transformaron de formato SHAPE a grid usando como base los límites y resolución espacial del MDE quedando con:

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 14

Esferoide: Clarke 1886

Datum: NAD 27.

Tamaño de celda: 100 m x 100 m

Dimensiones: 1,477 columnas por 1,372 renglones.

Antes de ser convertidas a formato grid, a las capas de área urbana, caminos y exclusión se les modificó el valor de las etiquetas para que al transformarse, el modelo pudiera identificar y manejar los píxeles.

7.2.1 Área urbana

Los años usados para crear la capa de área urbana se eligieron a partir de la disponibilidad de la información base (cartas topográficas 1:50 000 e imágenes satelitales SPOT; ver anexos 1, 2 y 3), utilizando 80's, 1995, 2001 y 2007-2008.

Para generar la capa de los años 80's se escanearon y geo-refirieron las cartas topográficas, la mayor parte de ellas de 1985 (Anexo 1), considerándose este con el año del análisis.

Posteriormente se digitalizaron las áreas urbanas, usando como base los vectoriales del año 1995 de INEGI, para evitar agregar polígonos presentes en los 80's y que un aparecieran en

los vectoriales más recientes, pues es poco probable que las construcciones urbanas desaparezcan una vez establecidas.

El área urbana de 1995 fue delimitada a partir de los vectoriales de INEGI escala 1:50 000. Debido a que la elaboró el organismo oficial generador de cartografía de nuestro país, esta información se usó de referencia para el análisis y edición de las otras fechas empleadas y por lo tanto, en este año no fue modificada. Como los vectoriales se encontraban en formato DXF¹ (*.dxf), fue necesario convertirlos a formato SHAPE² (*.shp)

Para delimitar los asentamientos humanos del 2001, se usaron imágenes pancromáticas SPOT. Debido a que éstas no contaban con ningún proceso de geo-referencia, fue necesario identificar la superficie que abarca la Cuenca en las imágenes, esto se realizó empleando las geoformas y los caminos.

Una vez determinada la ubicación de la cuenca, se recortó el área de interés para reducir el error y el tiempo de geo-referencia, ya que el área es de relieve accidentado y sólo una de las nueve escenas entraba por completo en la Cuenca. A los cortes, se les hizo una corrección geométrica rápida (con 10 puntos de control), que permitiera sobreponerles los vectoriales de caminos y así poder localizar los puntos de control a usar para la corrección geométrica final, aplicando el polinomio de primer grado y el método del vecino más cercano. Ya geo-referidas las imágenes, se digitalizó el área urbana editando los vectoriales de 1995 a 2001.

Los límites del área urbana del año 2008, se obtuvieron de imágenes SPOT pancromáticas y multibandas, las cuales se corrigieron a partir de los vectoriales de caminos sobrepuestos en la imagen.

Ya corregidas las imágenes, se digitalizaron los asentamientos humanos modificando el límite del área urbana del 2001 con el de 2008.

Para ambos años el desfase de las imágenes con respecto a los caminos que se permitió fue de 20 m. El número de puntos de control usados y el error medio cuadrático (RMS) de la corrección geométrica de las imágenes del 2008 se pueden ver en el Anexo 3.

Una vez completada la digitalización de las áreas urbanas, se re proyectaron las capas del 2001 y 2008 para que fueran homologables con las de 1985 y 1995 y se calculó su superficie total por estado y municipio para poder hacer una comparación con lo proyectado.

El marco de referencia espacial usado fue:

- Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 14 N
- Dátum: WGS 84

¹ El formato DXF (Drawing Exchange Format) es una representación de datos con etiqueta contenida en un archivo de dibujo de Auto CAD. (Autodesk)

² Un archivo de tipo shape almacena datos geométricos no topológicos e información de características espaciales en una base de datos. La geometría de un elemento se almacena como una forma vectorial con coordenadas (ESRI, 1998)

Ya que SLEUTH considera como área urbana valores mayores a 0 y menores a 256 (0 es la ausencia de área urbana; USGS, 2003), en este trabajo el valor que se tomó para toda el área urbana fue de 100.

7.2.2 Vías de transporte terrestre

Como el modelo requiere mínimo dos capas de caminos de diferentes fechas, y los vectoriales de 1995 podían ser modificados a partir de las cartas de 1985, se decidió utilizar 1995 y 1985.

Para poder editarlos fue necesario convertir los vectoriales de caminos de 1995 a formato SHAPE ya que también se encuentran en formato DXF. Se utilizaron para el análisis: brechas, terracerías, carreteras y carreteras de cuota.

Las vías de transporte se modificaron sobreponiendo los vectoriales de 1995 en las cartas topográficas de 1985, cambiando el identificador de la base de datos si el camino de 1995 era diferente del que mostraba la carta, ya sea que se hubiera transformado a terracería, brecha, carretera o carretera de cuota, o se eliminaba si no existía en 1985.

En ésta los valores que utiliza SLEUTH pueden ser binarios (presencia, ausencia) o relativos (0-100, donde 0 indica accesibilidad baja y 100 accesibilidad alta; USGS, 2003).

Para este trabajo se decidió poner valores relativos; el método para obtener estos se describe a continuación.

Se midió y ubicó el crecimiento de los diferentes tipos de vías terrestres entre 1985 y 1995. Una vez extraído lo que habían crecido los caminos en ese periodo, a cada tramo nuevo se le hizo un buffer de 100 m por lado y se vio cuánta área urbana abarcaba cada tipo de camino (Tabla 1). Con el área obtenida, se calculó el porcentaje que ocupaba con respecto al área total del buffer por tipo de camino (brecha, terracería, carretera o carretera de cuota). A partir de este porcentaje se estableció la accesibilidad de los caminos.

Tabla 1. Valores asignados a los píxeles de los diferentes caminos para el modelo SLEUTH.

Tipo de camino	Área total del buffer (ha) ^a	Área de asentamientos (ha) ^b	% ^c	Accesibilidad	Valor de etiqueta
Brecha	51,597.16	1,366.98	2.65	medio	50
Carretera	5,839.77	353.45	6.05	alto	100
Cuota	1,345.3	36.56	2.72	medio	50
Terracería	11,482.79	323.24	2.82	medio	50

^a Área total del buffer de cada tipo de camino

^b Área que abarcan los asentamientos humanos de los buffer

^c Porcentaje que ocupan los asentamientos humanos del área del buffer

Debido a que la clase Carretera presentó el mayor porcentaje de ocupación a sus lados, se le dio el valor de alto (100), mientras que las categorías Brecha, Terracería y Cuota con porcentaje alrededor del 3%, se les asignó un valor medio (50).

7.2.3 Pendiente del terreno y sombreado

Estas dos capas de información se derivaron del modelo de elevación digital (MED). El MED se generó a partir de las curvas de nivel obtenidas de los vectoriales de 1995. El tamaño de celda usado fue de 100 m x 100 m, debido a que a un tamaño menor (50 x 50 m) el programa se volvía lento y no tenía la capacidad suficiente para guardar los estadísticos. La pendiente se calculó en porcentaje, ya que el modelo exige este formato en un rango de 0-100.

7.2.4 Áreas de exclusión

Se modelaron dos escenarios de crecimiento urbano, el primero (E1), que considera como zonas de exclusión los cuerpos de agua y las zonas con políticas de conservación y protección, de acuerdo a los ordenamientos ecológicos territoriales de los estados que conforman la cuenca (D. F. (GDF, 2000), Estado de México (2003), Hidalgo (Salinas *et al.*, 2001) y Tlaxcala (GET *et al.*, 2002); el que corresponde a Puebla no fue posible conseguirlo); y el segundo (E2) donde únicamente se tomaron como áreas de exclusión los cuerpos de agua.

Los OET's se unieron y reclasificaron de acuerdo a la política ambiental de usos³ (aprovechamiento, conservación, protección y restauración; 7.3.3) aplicada a las unidades de gestión ambiental (UGAS⁴).

SLEUTH maneja valores de los píxeles en el rango 0-255, donde 0 indica que se puede dar el crecimiento y >100 que no es posible que se lleve a cabo.

En este trabajo las áreas de exclusión del primer escenario se establecieron a partir de las UGAS de los ordenamientos territoriales con políticas ambientales de protección y conservación, los cuerpos de agua y las Áreas Naturales Protegidas, asignándoles un valor de 100, pues en las primeras se restringe el desarrollo de actividades y en específico de urbanización, en las segundas no es posible que haya asentamientos a menos que sean drenados y las terceras son zonas donde su principal objetivo es mantener la composición y

³ Aprovechamiento. Permite la modificación de la estructura y funcionamiento de un ecosistema (Boege, 2004).
Conservación. Permite un manejo de los recursos naturales manteniendo la estructura y función de los ecosistemas (*op. cit.*).

Protección. Protege los recursos naturales del ecosistema. Permite un manejo que mantiene la composición, estructura y los servicios ambientales del ecosistema (*op. cit.*).

Restauración. Promueve la recuperación de las zonas degradadas, con posibilidad de manejo a mediano plazo (*op. cit.*).

⁴ UGA. Unidad de Gestión Ambiental ó Unidad mínima territorial. Ver Reglamento de OE 2003 donde se aplican tanto lineamientos como estrategias ambientales (de política ambiental) aunado con esquemas de manejo de recursos naturales, orientados a un desarrollo que permita la sustentabilidad (Rosete, 2007).

estructura del ecosistema, características que se perderían de establecerse asentamientos humanos. (7.2.4).

A las áreas de exclusión del segundo escenario sólo se le asignó un valor de 100 a los cuerpos de agua, ya que se quería medir el crecimiento sin ninguna restricción para así poder establecer las consecuencias que podría traer el no seguir las políticas de protección ambiental.

7.3 Conversión a formato Gif

Ya teniendo todas las capas con los valores requeridos para el SLEUTH, se transformaron a formato grid considerando el valor asignado y después a formato tiff con el programa Arc Info Workstation 9.2 para Windows y a formato gif con el programa Adobe Photoshop 7.0.

El procesamiento de las imágenes de satélite (corrección geométrica, cortes y clasificación) se hizo con el programa Erdas Imagine 8.4 y 9.1 y todos los procesos para generar las capas de información de entrada, el análisis de los resultados de SLEUTH y de la clasificación, se hicieron con el programa Arc Gis 9.2.

7.5 Corrida de los dos escenarios del modelo SLEUTH

Para obtener la predicción del crecimiento, se llevó a cabo el proceso de calibración descrito en el apartado 2.2.2.5 con la finalidad de encontrar los valores de los coeficientes (difusión, reproducción, propagación, resistencia-pendiente y caminos gravedad) que mejor se ajusten al área de estudio. Este proceso constó de cuatro fases: la Bruta (Coarse), Fine (Fina), Final (Final) y la de Predicción (Forecasting).

El proceso de calibración se efectuó de acuerdo a las recomendaciones del manual de uso de SLEUTH (USGS, 2003).

7.5.1 Calibración de los escenarios

Para poder hacer la calibración, primero se probó el modelo con un escenario “Test” para verificar que ambos estuvieran correctos. Una vez hecho lo anterior, se modificó el archivo con los parámetros antes señalados y se corrió el proceso.

7.5.1.1 Calibración bruta

En esta calibración se utilizaron valores para los cinco coeficientes que estuvieran en un rango de 0-100, donde 0 fue el de inicio y 100 el de término, con pasos de 25, ya que así lo establece el manual del programa (2.2.2.5; Anexo 5). El número de iteraciones Monte Carlo implementadas fue 5.

7.5.1.2 Calibración fina

Para seleccionar los coeficientes a usar en esta fase, se utilizó el archivo control_satats.log derivado de la calibración bruta. Dicha selección se hizo comparando las tres primeras

corridas con el valor más alto en el índice Lee-Sallee (2.2.2.5; Anexo 3 y 4, Calibración bruta), quedando los valores para cada coeficiente del E1 y E2 como lo muestra el Anexo 5.

En los coeficientes Diff, Brd y Sprd se decidió el rango de 0-25 ya que en los de difusión y reproducción existió un empate de 1 en las primeras corridas y el valor que les siguió fue de 25 (alrededor de la corrida 20); en el caso del de propagación, también se dio un empate de 25 por lo que se decidió abrir el rango hacia abajo, quedando en 0 (Anexo 3 y 4, Calibración fina y Anexo 6).

El de resistencia-pendiente quedó de 75-100 y el de Caminos-gravedad de 0-25 ya que las primeras tres corridas tenían esos valores, respectivamente (Anexo 3 y 4, Calibración fina y Anexo 6).

Se modificaron los valores de los coeficientes del escenario utilizado para la calibración bruta y se corrió el modelo.

7.5.1.3 Calibración final

Para la obtención de estos coeficientes se siguió el mismo método mencionado en la fina, los coeficientes resultantes se muestran en el Anexo 6.

Los valores de difusión y reproducción quedaron en el rango de 1-5 ya que hubo un empate en las primeras corridas y el número que siguió fue el 5. Como el de propagación tuvo un empate de 20, se abrió el rango de 18-23. El de resistencia se estableció de 75-80 ya que al haber un empate en las primeras tres corridas, se empleó el de la cuarta que era 80. Por último, se le asignó un intervalo de 0-10 al de caminos-gravedad porque son los valores de las primeras dos corridas (Anexos 3 y 4, Calibración final y Anexo 7).

Se modificaron los valores de los coeficientes del escenario utilizado para la calibración fina y se corrió el modelo.

7.5.1.4 Calibración de predicción

Esta calibración se corre con la finalidad de encontrar los coeficientes de mejor ajuste de término (2.2.2.5) ya que con las anteriores, los que se obtienen son los de inicio y como estos pueden ser modificados por el modelo a lo largo del proceso, es importante encontrar y usar los modificados por el mismo.

En esta calibración únicamente se toman en cuenta los valores de la corrida con el valor más alto en el índice Lee-Salle (Anexo 3 y 4, Calibración final), quedando como indica el Anexo 7.

Una vez seleccionados los coeficientes, se modificó tanto el valor de los coeficientes como el de las iteraciones Monte Carlo (200 iteraciones), del escenario usado en la calibración Final y se corrió el modelo.

7.5.1.5 Corrida de la predicción

Para la obtención de los coeficientes a utilizar en la predicción se ocupó el archivo avg.log que arrojó la calibración de predicción. Se seleccionaron los valores de los coeficientes del año de término (2008; Anexo 3 y 4, Calibración de predicción) quedando como muestra el Anexo 8.

Para correr la predicción se requiere modificar el valor de los coeficientes, el número de iteraciones Monte Carlo y el periodo a modelar. Para lo primero se utilizaron los valores antes especificados; el número de iteraciones fue de 200 y el intervalo de tiempo fue de 26 años (2009-2035). De acuerdo con el manual, el intervalo de proyección debe ser igual al de calibración. En este caso fue de 23 años, pero como $2009+23=2032$, se redondeó a 2035 que es el quinquenio siguiente más cercano.

Se modificó el escenario usado en la calibración anterior con los valores antes especificados y se corrió el modelo.

7.6. Transformación y manejo de la información obtenida de SLEUTH

Debido a que el modelo arroja el crecimiento por año (de 2009 a 2035), con la finalidad de hacer más clara la descripción del crecimiento predicho de los asentamientos humanos se utilizaron los resultados de los años: 2020 y 2035. Una vez hecha la transformación, se calculó el área que tendrán los asentamientos humanos por estado y por municipio, también se calculó la superficie que se perderá de bosque, matorral, zonas agropecuarias y suelo desnudo (a partir de la capa de uso de suelo y vegetación generada en este estudio; ver apartado 7.7), de las Áreas Naturales Protegidas y de las UGA's de conservación y protección que están dentro de la Cuenca.

7.7. Clasificación de las imágenes de satélite

Se realizó una clasificación supervisada de imágenes SPOT de 2007-2008 (Anexo 2) para calcular cuánta cobertura natural se perdería de acuerdo a los escenarios de crecimiento urbano modelado. Por ser un estudio a nivel regional, se trabajó una leyenda generalizada de la Vegetación y uso de suelo Serie III de INEGI quedando 9 clases. Posteriormente se redujeron a 8, englobando en la 1 (Bosques) lo que anteriormente eran 1 y 2 (bosque de coníferas y bosque de hojosas, respectivamente), esto para disminuir el error ya que el trabajo de campo no permitió discriminar ambas clases en la clasificación (Tabla 10). La leyenda final se muestra a continuación.

Leyenda INEGI (2005)		Leyenda Final
Cobertura	Tipo	Cobertura
Agricultura	Temporal riego	Agropecuario
Pastizal	Inducido Pradera de alta montaña	Pastizal de alta montaña
Bosque	Encino Encino-Pino Oyamel Pino Pino-encino Tascate Mesófilo de Montaña	Bosque
Matorral	Plantaciones forestales Crasicaule	Matorral
Otros tipos de vegetación	Desértico rosetófilo	
Suelo desnudo	Chaparral	Suelo desnudo
Asentamientos humanos		Asentamientos humanos
		Cuerpos de agua
		Nubes

Para realizar la clasificación supervisada se consideraron 10 campos de entrenamiento al azar por cobertura vegetal por imagen, quedando un total de 390 campos de 20m x 20m, de los cuales 315 se identificaron con Google Earth y 75 se corroboraron en campo.

Se evaluó la separabilidad de las firmas espectrales de los campos de entrenamiento para eliminar aquellos cuyas firmas fueran similares con otros, utilizando la divergencia transformada. Los valores de divergencia se ubican entre 0 y 2000, donde todo número mayor a 1,900 indica que las firmas son idealmente diferentes para poder separar las clases, de 1,700 a 1,899 la separación es suficiente y de 1699 a 0, es mala (Erdas, 1999).

En la clasificación se consideraron los valores de separabilidad de firmas iguales o mayores a 1,700 y se eliminaron los campos con firmas que tenían un valor menor a y que se confundían con más de tres firmas.

En la clasificación se empleó la regla paramétrica de máxima verosimilitud que se basa en la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase determinada (Erdas, 1999; Chuvieco, 1990).

Una vez hecha la clasificación se hizo una reclasificación para agrupar las subclases obtenidas de la clasificación en las clases consideradas. Después se realizó una generalización para eliminar categorías que abarcaran menos de 4 píxeles y se procedió a la verificación.

Para establecer el número de puntos de verificación necesarios, Chuvieco (1990) menciona la fórmula:

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2}$$

Si se quiere conocer el número de puntos para estimar con el 95% de probabilidad el error de determinado mapa, suponiendo que los aciertos son del 85% y el máximo error permitido es de $\pm 5\%$, entonces:

$$n = \frac{(1.96)^2 (85)(15)}{(5)^2} = 195.92$$

Por lo tanto, se requiere un mínimo de 196 puntos. En este estudio se utilizaron un total de 225 puntos. Una vez hecha la verificación, se creó la matriz de confusión y se calculó:

- Fiabilidad:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} 100$$

Donde $\sum X_i$ es el número de aciertos y $\sum \sum X_{ij}$ es número total de puntos.

- Umbrales inferior y superior en los que se encuentra la exactitud real del mapa:

$$F = F_m \pm zEs$$

Donde z indica la abcisa del área bajo la curva normal para el nivel de probabilidad $(1-\alpha)$; ES es el error estándar del muestreo en función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de muestra (n):

$$ES = \frac{\sqrt{pq}}{n}$$

- Índice Kappa (k) que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que se espera por azar; intenta delimitar el grado de ajuste debido a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. La fórmula es:

$$k = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}}$$

Donde X_{ii} indica el acuerdo observado y $X_i X_i$, el acuerdo esperado. El acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz y el esperado es el resultado del producto de los marginales.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Crecimiento de los asentamientos humanos

Para observar el crecimiento en la Cuenca de México, se obtuvieron cuatro capas de asentamientos humanos de diferentes años en el pasado (1985, 1995, 2001 y 2008) y dos modelos de crecimiento urbano futuro (E1 y E2, 2008-2035).

El E1 (con los OET's y cuerpos de agua como restricción al crecimiento) tuvo un ajuste de 0.71 (índice Lee-Sallee; Anexo 3, calibración de predicción) y el E2 (con cuerpos de agua como restricción) de 0.7 (índice Lee-Sallee; Anexo 4, calibración de predicción).

8.1.1 Crecimiento en la Cuenca de México

8.1.1.1 Crecimiento de 1985 a 2008

El área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008, tuvo un incremento de 697.77 km², ocupando 1,879.8 km² (Tabla 2), que corresponden al 19.5% del área total de la cuenca (Tabla 3).

En el periodo de 1985-1995 los asentamientos cubrían una superficie de 1,608.01 km², teniendo la mayor tasa de crecimiento de los tres rangos estudiados (42.6 km²/año; Tabla 3), dándose principalmente en el Distrito Federal y Estado de México, siendo superior en el segundo (Fig. 10).

Tabla 2. Área de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008.

Año	Área km ²	Ocupación %	Incremento desde 1985 km ²
1985	1,182.03	12.3	0
1995	1,608.01	16.7	425.97
2001	1,702.58	17.7	520.54
2008	1,879.8	19.5	697.77

Tabla 3. Tasa de crecimiento e incremento por periodo de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008.

Año	Tasa de crecimiento km ² /año	Incremento/periodo km ²
1985-1995	42.6	425.97
1995-2001	15.76	94.57
2001-2008	22.15	177.22

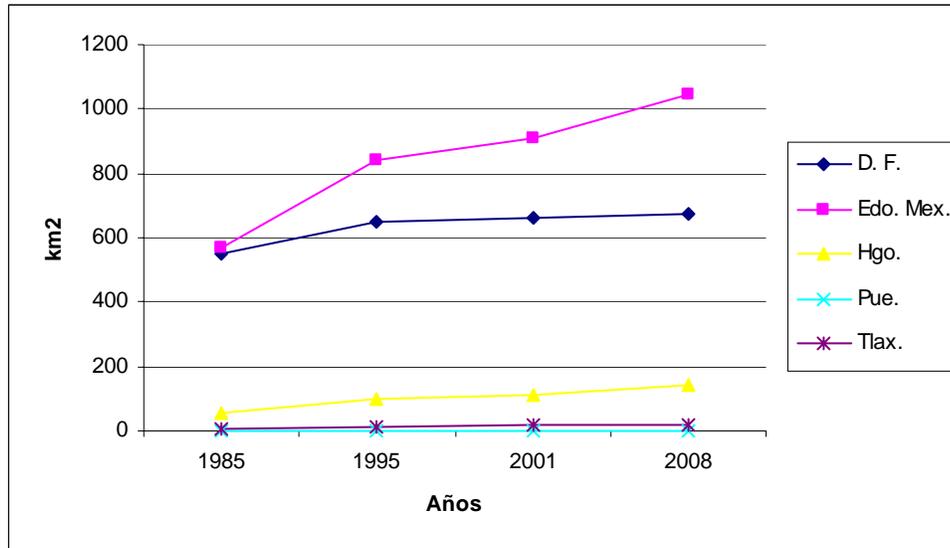


Fig. 10. Crecimiento de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los estados que ocupan la Cuenca de México. D. F.: Distrito Federal; Edo. Mex.: Estado de México; Hgo.: Hidalgo; Pue.: Puebla; Tlax.: Tlaxcala.

Villarreal y Aguirre (2003), mencionan que los movimientos migratorios en este periodo (1985-1995) fueron principalmente intrametropolitanos, provocados por tres factores:

1. El encarecimiento del precio de las viviendas y escasez de terrenos, acompañados de la crisis económica;
2. Desarrollo de la actividad económica en algunos de los municipios del Estado de México y
3. El cambio de uso de suelo en las delegaciones centrales del D. F., al vender o alquilar las viviendas y departamentos para oficinas.

Esto propició el traslado de la población del centro, a las delegaciones del sur y a los municipios del norte de la ZMCM, incrementándose la mancha urbana y la superficie que ocupa, lo que resultó en la incorporación de nuevos municipios a la ZMCM (en los años 80's¹ abarcaba 23 municipios y para 1995² ya cubría 50 municipios; Fig. 11; Villarreal y Aguirre, 2003). Lo anterior concuerda con lo encontrado en el presente estudio, ya que son el Estado de México y el Distrito Federal, los que presentan mayor incremento (Fig. 10).

De acuerdo con Villarreal y Aguirre (2003), la expansión de la metrópoli se debió en gran medida al encarecimiento del precio de las viviendas y a la escasez de terrenos en la ciudad, propiciando la integración de nuevos municipios a la ZMCM, ya que estos ofrecían espacios y precios más accesibles para la población.

¹ Durante los 80's la ZMCM incluía 17 municipios del Estado de México y las 16 delegaciones del Distrito Federal. Los municipios que conformaban esta zona se pueden consultar en el Anexo 11.

² En los 90's se sumaron 26 municipios del Estado de México y 1 del estado de Hidalgo, quedando un total de 44 municipios conurbados y las 16 delegaciones (Villarreal y Aguirre, 2003). Los municipios se pueden consultar en el Anexo 11 y 13.

Dávila *et al.* (2007), concuerdan con lo anterior, al afirmar que la expansión hacia esas zonas se debió principalmente al valor económico de éstas, ya que hacia la zona norte-oriente se ubica la población con condiciones más precarias y en la sur-poniente con las mejores. Este tipo de arreglo tiene diferentes causas:

- Geográficas. El sur-poniente tienen mejores condiciones climáticas y ecológicas que elevan el precio del suelo, excluyendo a la población de ingresos bajos.
- Económicas. Los nuevos centros de desarrollo financiero y de servicios especializados se ubican en el centro histórico y en la parte poniente de la zona.
- Políticas. Desde 1970 el Gobierno del Distrito Federal se propuso desconcentrar las actividades económicas de la Ciudad de México y lograr una mejor distribución de la población (Villarreal y Aguirre, 2003) lo que llevó a la creación de asentamientos en la parte norte y oriente del Estado de México en donde se disponía de mayor espacio.

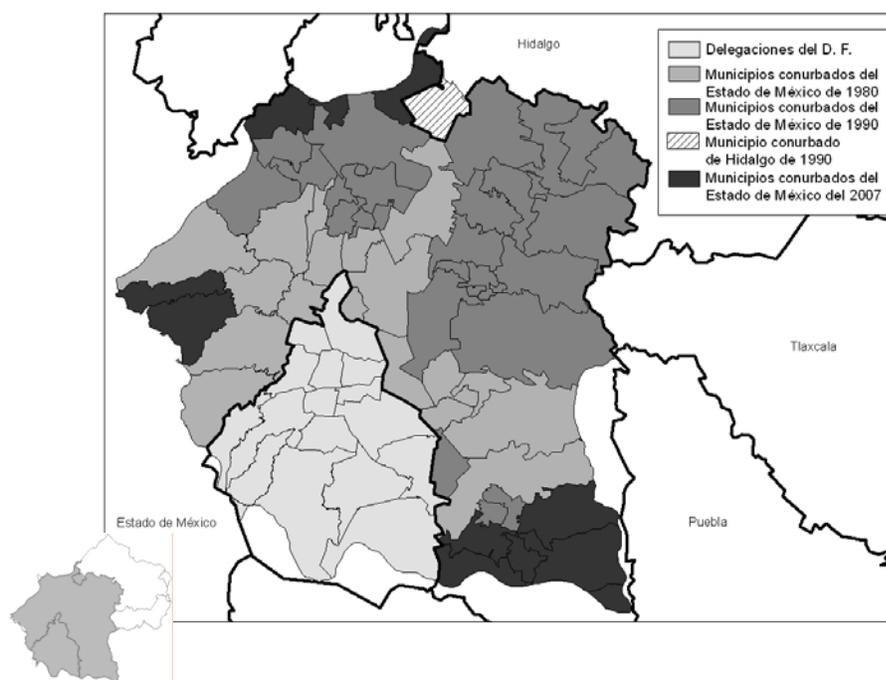


Fig. 11. Municipios conurbados de la Cuenca de México de 1980 a 2007. Fuente: Elaboración propia a partir de Villarreal y Aguirre (2003) e INEGI (2007).

El periodo siguiente (1995-2001) presentó la menor tasa de crecimiento ($15.76 \text{ km}^2/\text{año}$; Tabla 3) ocupando $1,608.01 \text{ km}^2$ de la Cuenca (17.7 %; Tabla 2), dándose principalmente en el Estado de México e Hidalgo (Fig. 10).

Lo anterior se ve reflejado al observar la incorporación de los municipios, ya que es en los 90's cuando se incorpora Tizayuca a la ZMCM (Fig. 11; Villarreal y Aguirre 2003).

En 1995 el país enfrentó una de las crisis económicas más importantes de su historia moderna, lo que impactó fuertemente sobre el empleo e ingresos de casi la totalidad de su población,

influenciando la distribución socio-espacial de la urbe, propiciando el poblamiento de la zona norte y oriente (Dávila *et al.*, 2007), esto podría explicar el cambio en el patrón del crecimiento.

En el último periodo (2001-2008), la tasa de crecimiento aumentó a 22.15 km²/año (Tabla 3), ocupando el 19.5% de la superficie de la Cuenca de México (Tabla 2), siendo el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal los que tuvieron mayor incremento, Tlaxcala y Puebla presentan el menor registrado en el intervalo de tiempo estudiado (Fig. 10).

Este crecimiento se comprueba al observar la incorporación de los 12 municipios del Estado de México a la ZMCM (Fig.11; INIEGI, 2007)

8.1.1.2 Crecimiento proyectado con SLEUTH

De acuerdo con los dos escenarios (E1: con los OET's y cuerpos de agua como restricción al crecimiento; E2: con cuerpos de agua como restricción) modelados por SLEUTH, los asentamientos humanos crecieron con la misma tendencia observada en el periodo 1985-2008, siendo el E2 el que presentó un mayor incremento (Fig. 12), ocupando una superficie de 2,613.89 km², es decir, el 27.2% de la superficie total de la cuenca (Tabla 4).

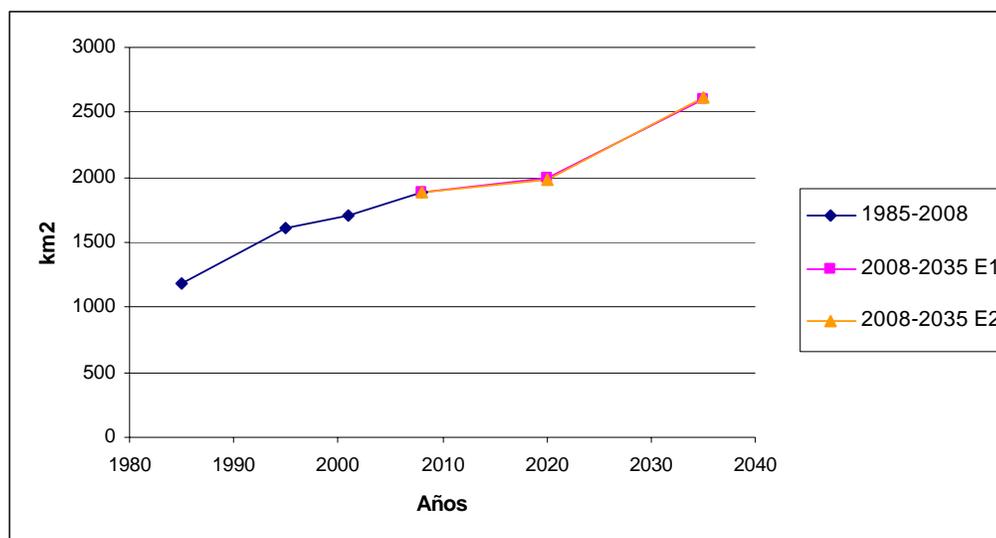


Fig. 12. Crecimiento de los asentamientos humanos de la Cuenca de México de 1985 a 2008 y de los dos escenarios modelados con SLEUTH de 2008 a 2035. E1: escenario 1; e2: escenario 2.

Tabla 4. Área de los asentamientos humanos de los escenarios E1 y E2 modelados con SLEUTH.

Escenario	Año	Área km ²	Ocupación %
1°	2020	1,998.57	20.8
	2035	2,605.57	27.1
2°	2020	1,975.92	20.5
	2035	2,613.89	27.2

En los dos escenarios, el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal son los que tendrán mayor crecimiento de los asentamientos humanos pero en el E2 el incremento será menor (Fig. 13).

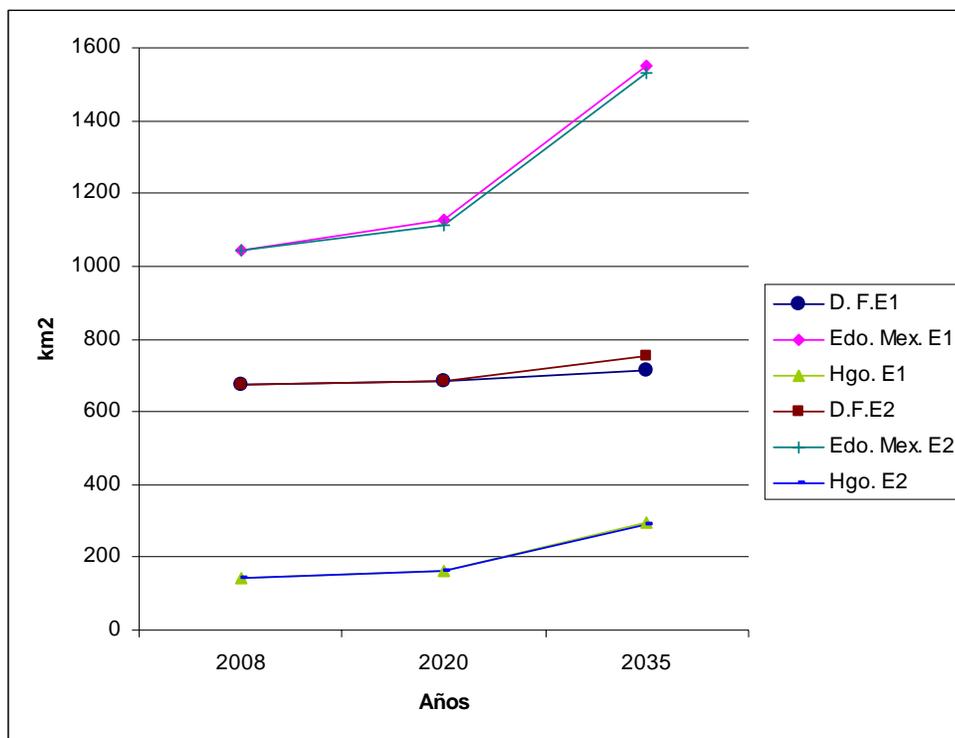


Fig. 13. Crecimiento de los asentamientos humanos en los estados que ocupan la Cuenca de México de 2008 a 2035 de los escenarios E1 y E2 modelados con SLEUTH. D. F.: Distrito Federal; Edo. Mex.: Estado de México; Hgo.: Hidalgo. E1: escenario 1; E2: escenario 2.

En el periodo 2008-2020 los asentamientos humanos tuvieron un incremento de 118.76 km² en el E1 y 96.1 km² en el E2, esto es de extrañar ya que se esperaba que el E2 fuera superior al E1, pues no contaba con las mismas restricciones para el crecimiento (Tabla 5).

Tabla 5. Incremento de los asentamientos humanos de los dos escenarios modelados por SLEUTH en los periodos 2008-2020 y 2020-2035.

Escenario	Periodo	Incremento km ²
1°	2008-2020	118.76
	2020-2035	606.99
2°	2008-2020	96.1
	2020-2035	638

De acuerdo con el E1 y el E2, el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal son los que presentaron mayor crecimiento, pero en el E2 el incremento fue menor (Fig. 13).

En su estudio “La expansión urbana probable de la Ciudad de México”, Suárez y Delgado (2007) encontraron que la ZMCM puede ocupar en el año 2020, desde 39,000 ha hasta 55,000 ha, dependiendo el escenario que se cumpla³. En este trabajo se obtuvo que la ZMCM (Estado de México y Distrito Federal), abarcará alrededor de 7,900 ha en el E1 y 9,716 ha en el E2 (Fig. 13), valores muy por debajo a los expuesto por Suárez y Delgado (2007).

Tal diferencia se puede deber a que en el presente trabajo se utilizó la dinámica de crecimiento pasado (capas de áreas urbanas 1985, 1995, 2001 y 2008) para deducir el crecimiento futuro, y en el de Suárez y Delgado (2007), la proyección se hizo usando la cartografía de 1995 y 2001 de las AGEB´s, estableciendo diferentes densidades de población y de poblamiento de los municipios, donde supone que la “ciudad interior” sufre despoblamiento y los contornos reciben esa población, condición que va en contra de lo implantado por el “Bando 2”⁴.

En el “Bando dos”, se restringe el crecimiento de la mancha urbana en las delegaciones Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Iztapapala, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco (Mollá, 2006), permitiéndose en las delegaciones Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza (Delgadillo, 2009) y son estas cuatro últimas las que forman la ciudad interior de Suárez y Delgado (2007).

En este trabajo, el “Bando 2” se da por entendido puesto que se tomó el crecimiento espacial de los asentamientos de 2001 a 2008 como variable de calibración, resultando en un crecimiento horizontal de los asentamientos humanos mucho menor al de Suárez y Delgado (2007).

En el periodo de 2020-2035 del E1, el área de los asentamientos humanos ocupó el 27.1% de la superficie total de la cuenca, abarcando 2,605.57 km². En el E2 fue de 2,613.89 km², 637.96 km² más que en 2020, abarcando el 27.2% de la misma (Tabla 4 y 5).

En los escenarios 1 y 2 los estados con mayor incremento fueron el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal, habiendo mayor crecimiento del Distrito Federal y Estado de México en el E2 (Fig. 13).

8.1.2 Crecimiento en el Distrito Federal

8.1.2.1 Crecimiento de 1985 a 2008

En 1985 los asentamientos humanos ocupaban 547.94 km² y para 1995 650.75 km², teniendo un incremento de 102.82 km², el mayor del periodo de estudio (Tabla 6).

³ En su estudio, Suárez y Delgado (2007), generaron tres escenarios de expansión metropolitana: uno optimista (E1), otro pesimista (E2) y uno intermedio (E3), elaborados a partir de los vectoriales de 1995, las AGEB´s, las proyecciones de población hechas por la CONAPO al 2020 y de diferentes supuestos de densidad poblacional, mediante un análisis estadístico con SIG.

⁴ El Bando 2 es un instrumento de política de desarrollo urbano cuyo objetivo es revertir el crecimiento desordenado de la ciudad, la expansión urbana y el despoblamiento de las áreas centrales; preservar el Suelo de Conservación y facilitar el acceso de vivienda a la población pobre en las delegaciones centrales (Delgadillo, 2009).

Tabla 6. Superficie de los asentamientos humanos del Distrito Federal de 1985 a 2008.

D. F.				
Año	Superficie de los asentamientos		Incremento/periodo	
	km ²	%	km ²	%
1985	547.94	42.4	s/d	s/d
1995	650.76	50.4	102.82	8
2001	660.96	51.2	10.2	0.8
2008	674.83	52.3	13.87	1.1

s/d, sin datos

Las delegaciones que tuvieron mayor incremento en superficie de los asentamientos humanos entre 1985 y 1995 fueron Iztapalapa, Tlalpan, Álvaro Obregón, Xochimilco, Miguel Hidalgo, Cuajimalpa de Morelos, Tláhuac y Milpa Alta (Fig. 14), lo que confirma lo expuesto anteriormente (8.1.1.1) ya que a excepción de Miguel Hidalgo, todas las demás pertenecen a la periferia sur del D. F. (Fig. 15).

Para el año 1985, la delegación Iztacalco ya tenía el 100% de su territorio cubierto por los asentamientos humanos y para 1995, también las delegaciones de Benito Juárez, Coyoacán, Cuahutémoc y Miguel Hidalgo; Venustiano Carranza, Azcapotzalco e Iztapalapa, rebasaron el 90% (Anexo 9).

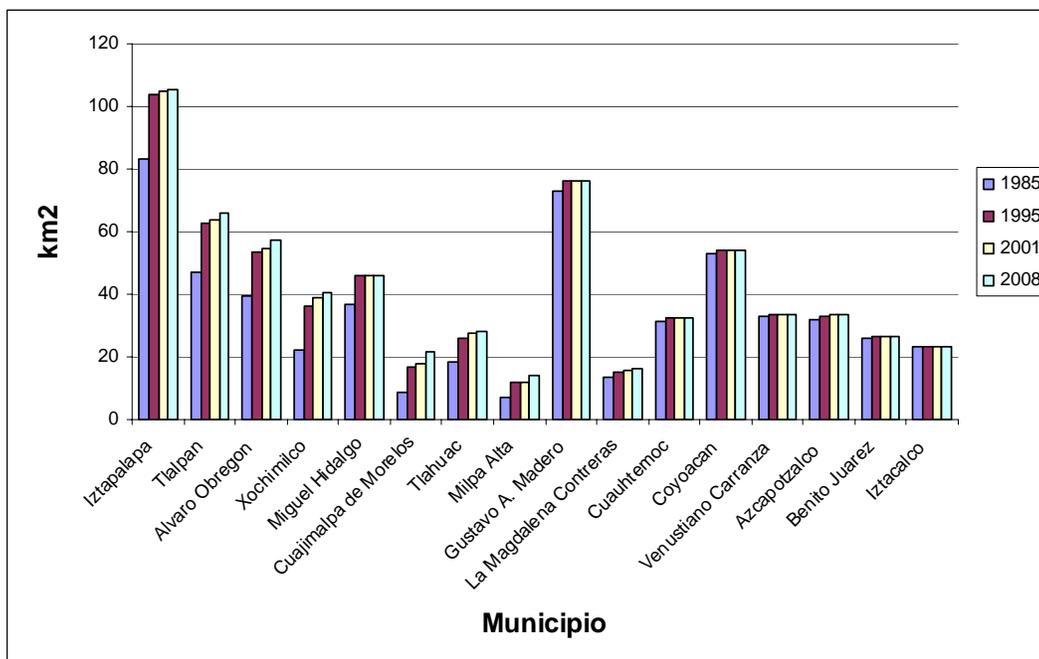


Fig. 14. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en las delegaciones del Distrito Federal. Las delegaciones se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 1985-1995.

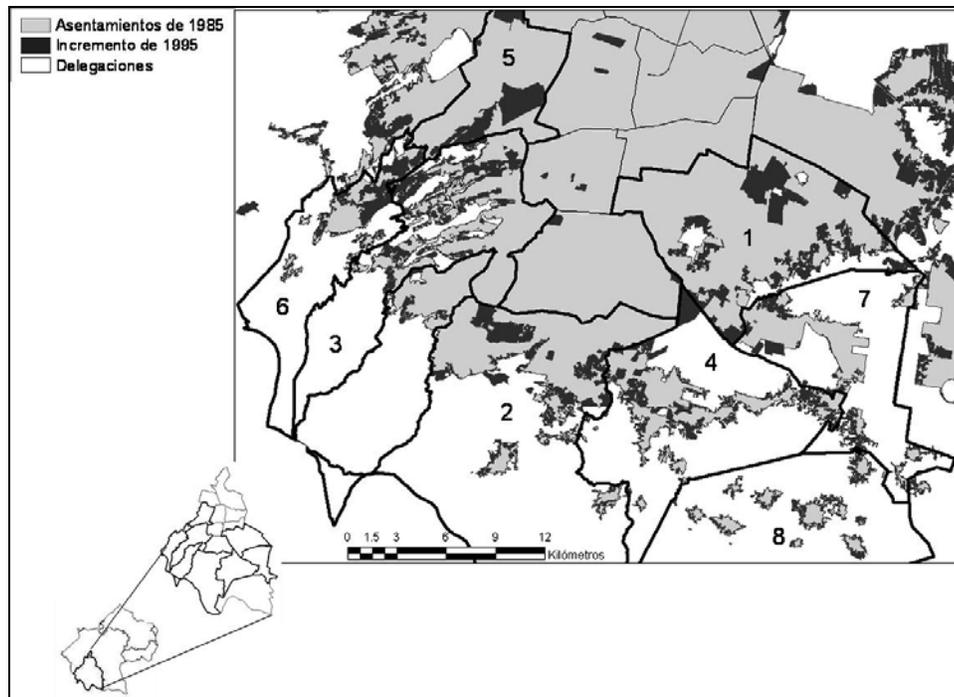


Fig. 15. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995. 1. Iztapalapa, 2. Tlalpan, 3. Álvaro Obregón, 4. Xochimilco, 5. Miguel Hidalgo, 6. Cuajimalpa de Morelos, 7. Tláhuac y 8. Milpa Alta

En el periodo de 1995 a 2001 los asentamientos avanzaron 10.2 km^2 , 10 veces menos que de 1985 a 1995 (Tabla 6). Dicho crecimiento se ve reflejado en las delegaciones, donde el incremento fue de entre 0.1 y 2.6 km^2 , siendo Xochimilco la que registró el valor más alto (2.61 km^2) le siguieron Tláhuac, Cuajimalpa de Morelos, Iztapalapa, Tlalpan y Álvaro Obregón (entre 1 y 1.5 km^2); Milpa Alta obtuvo el menor (0.18 km^2 ; Fig. 14, Anexo 9).

De acuerdo con Villarreal y Aguirre, 2003, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero, Azcapotzalco e Iztacalco presentaron en este periodo tasas negativas, lo que significa que tuvieron pérdida de población.

Esto muestra que el avance de los asentamientos humanos siguió dándose hacia el sur pero en menor proporción y con un cambio de dirección, ya que de 1985 a 1995, las 3 delegaciones que más crecieron (Iztapalapa, Tlalpan y Álvaro Obregón) en 1995 a 2001 ocupan el 4°, 5° y 6° lugar, respectivamente (Fig. 16; Anexo 9).

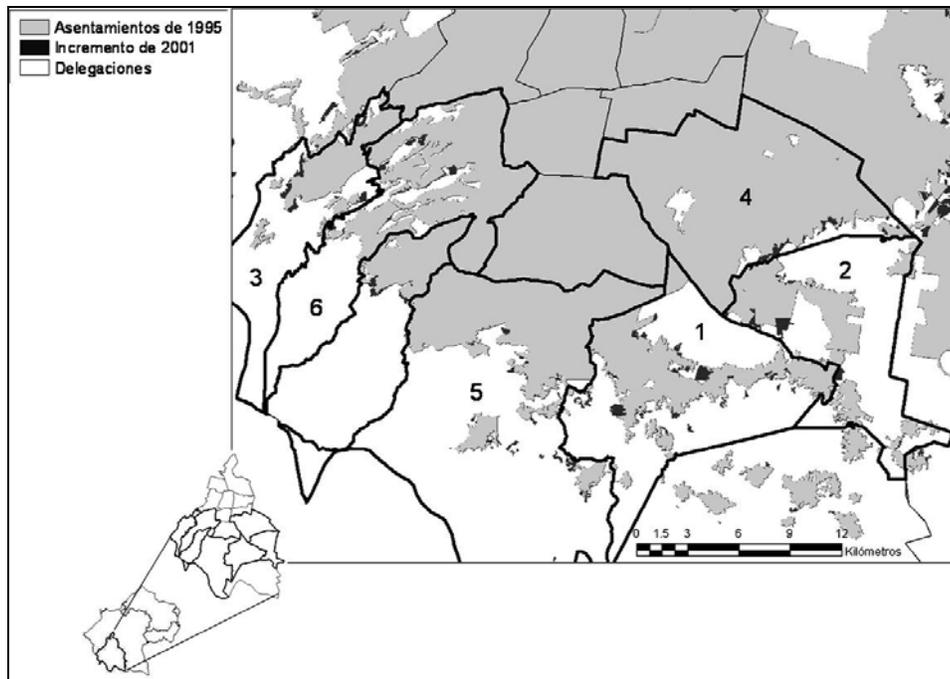


Fig. 16. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001. 1. Xochimilco, 2. Tláhuac, 3. Cuajimalpa de Morelos, 4. Iztapalapa, 5. Tlalpan y 6. Álvaro Obregón.

En 1994 la zona de conservación ecológica quedó definida en una superficie de 86,804 ha (58% del territorio del Distrito Federal) donde se encuentran áreas boscosas de protección y conservación y zonas agropecuarias (Cruz, 2002).

El 78% de la superficie boscosa se ubica en las delegaciones de Milpa Alta y Tlalpan, mientras que el resto está en Cuajimalpa, La Magdalena Contreras y Álvaro Obregón. En cuanto a la actividad agrícola son importantes Tláhuac, Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta. Lo que se refiere a la pecuaria, el 52% se concentra en Tláhuac y Milpa Alta (*op. cit.*).

Es probable que dicho decaimiento en el crecimiento fue provocado por el establecimiento de la zona de conservación, propiciando el encarecimiento de los terrenos (Villarreal y Aguirre, 2003) que, aunado a la crisis económica, obligó a la población a migrar hacia el norte.

Del 2001 al 2008 los asentamientos humanos tuvieron un incremento de 13.87 km² ocupando el 52.3% de la superficie del Distrito Federal (Tabla 6). Las delegaciones que presentaron mayor crecimiento fueron Cuajimalpa de Morelos (3.57 km²), Álvaro Obregón (2.6 km²), Tlalpan (1.98 km²), Milpa Alta (1.96 km²) y Xochimilco (1.84 km²; Fig. 14, Anexo 9), todas pertenecientes a la zona sur.

Lo anterior indica un cambio en la dirección del crecimiento ya que de 1995 a 2001, los asentamientos humanos avanzaron hacia Xochimilco, Tláhuac y Cuajimalpa (Fig. 16) y de 2001 a 2008 a Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón (Fig. 17).

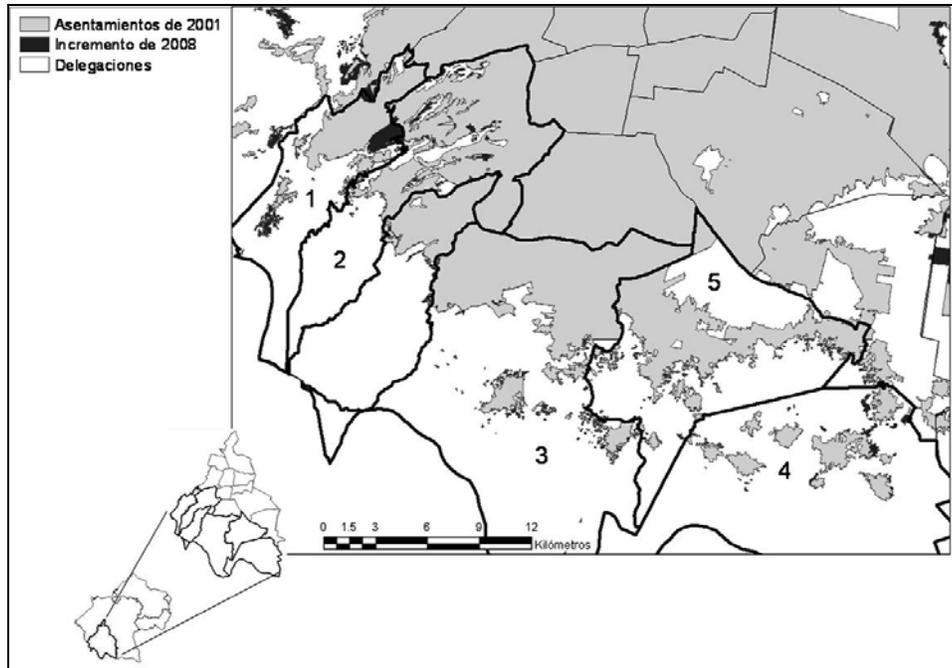


Fig. 17. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008. 1. Cuajimalpa de Morelos, 2. Álvaro Obregón, 3. Tlalpan, 4. Milpa Alta y 5. Xochimilco

8.1.2.2 Crecimiento modelado con SLEUTH

En el periodo de 2008-2020, los asentamientos humanos ocuparon el 53.1% del Distrito Federal (685.05 km^2) en el E1 y 53% en el E2 (684.36 km^2 ; Tabla 7).

En el E1 el crecimiento se dirige hacia el sur, en las delegaciones Álvaro Obregón, Tláhuac y Xochimilco (Fig. 18), Venustiano Carranza queda 100% cubierta (Anexo 10) y el incremento se da por la expansión de la periferia de los asentamientos humanos.

Tabla 7. Superficie de los asentamientos humanos del Distrito Federal de E1y E2 modelados con SLEUTH del 2020 a 2035.

Distrito Federal					
Año	Superficie de la entidad km^2	E1		E2	
		km^2	%	km^2	%
2020	1,290.96	685.05	53.1	684.36	53
2035	1,290.96	715.90	55.5	752.64	58.3

E1: escenario 1; E2: escenario 2

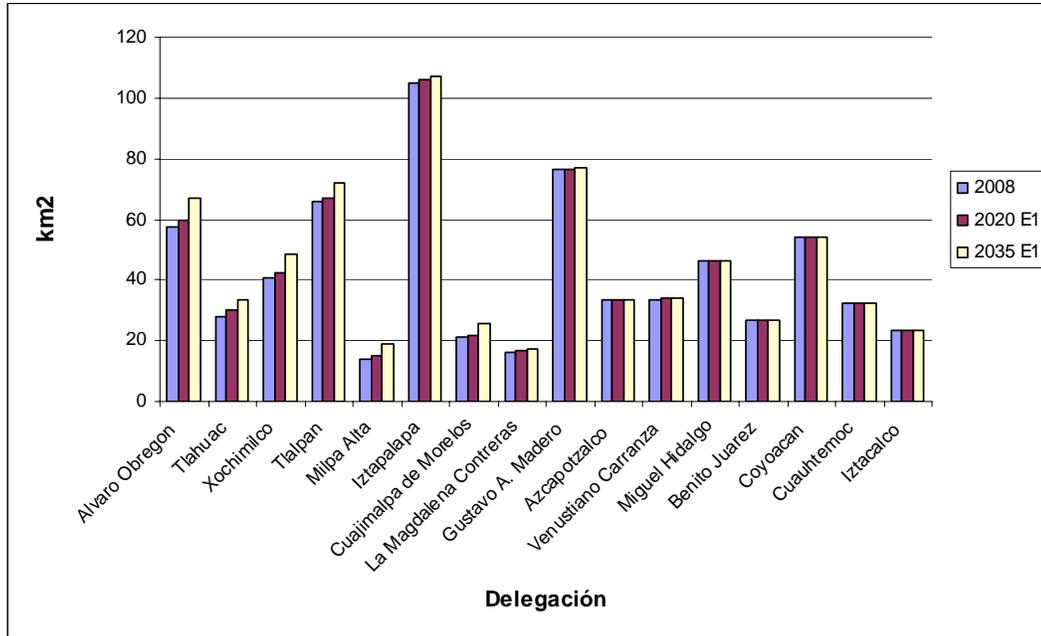


Fig. 18. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en las delegaciones del Distrito Federal. E1: escenario 1. Las delegaciones se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

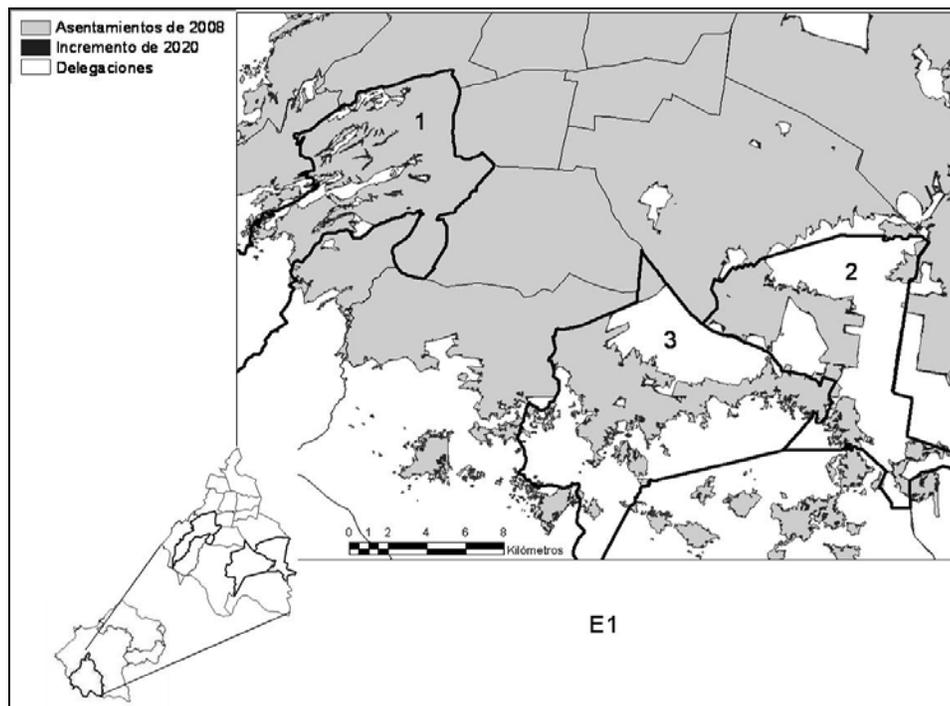


Fig. 19. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH. E1: escenario 1. 1. Álvaro Obregón, 2. Tláhuac y 3. Xochimilco.

En el E2 el crecimiento también se dará hacia el sur, principalmente en las delegaciones Tláhuac, Xochimilco y Álvaro Obregón, (Fig. 20), será por el incremento de la periferia de los

asentamientos humanos (Fig. 21) y al igual que en el E1, cubrirán por completo el territorio de Venustiano Carranza (Anexo 10).

Comparando ambos escenarios, se observa que hay una modificación en la dirección del crecimiento de los asentamientos, ya que en el E1, la delegación con mayor incremento fue Álvaro Obregón y en el E2 ocupó el tercer lugar (Anexo 10).

Suárez y Delgado (2007), encontraron que las delegaciones con mayor probabilidad de urbanización son Milpa Alta y en menor medida Tláhuac y Xochimilco, lo que concuerda con lo obtenido en el presente trabajo, ya que Tláhuac y Xochimilco ocuparon el 2° y 3er lugar en crecimiento.

Estos autores también mencionan que en Álvaro Obregón el territorio con probabilidad de ser urbanizable es escaso debido al relieve, en el presente trabajo ocupó el 1er lugar en crecimiento en el E1 y el 3° en el E2.

El que la superficie de los asentamientos haya sido superior en el E1 nos permite deducir que todavía existen áreas que no tienen restricciones para el crecimiento de los mismos y por lo tanto, el OET no es un factor que los limite.

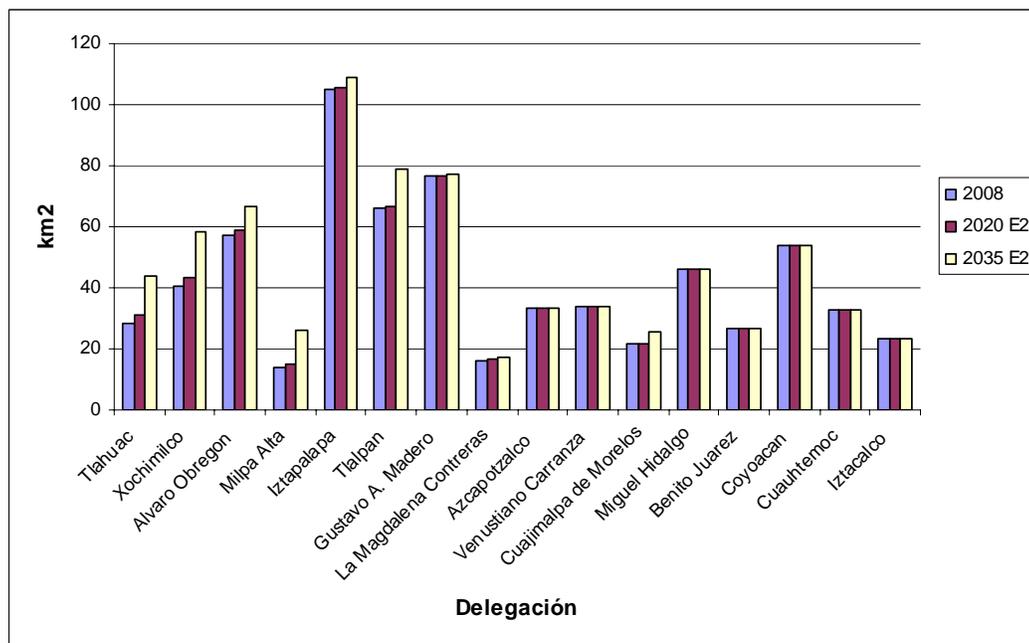


Fig. 20. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en las delegaciones del Distrito Federal. E2: escenario 2. Las delegaciones se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

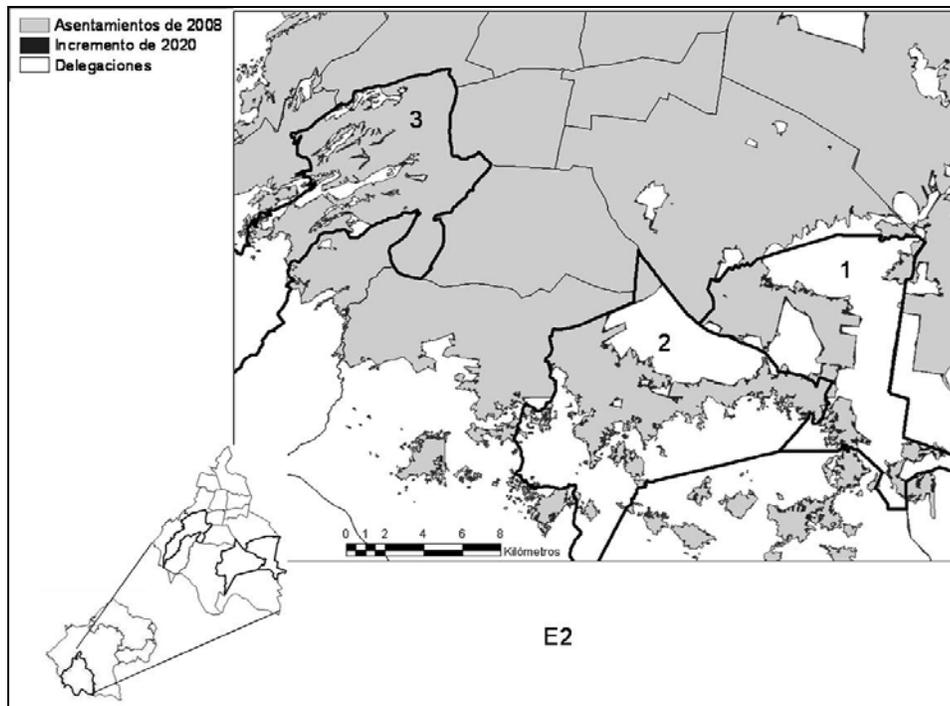


Fig. 21. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH. 1. E2: escenario 2. Tláhuac, 2. Xochimilco y 3. Álvaro Obregón

En el periodo 2020-2035 los dos escenarios muestran crecimientos contrastantes de los asentamientos humanos, mientras el E1 predice una superficie de 715.9 km² (Tabla 7) concentrándose en las delegaciones de Álvaro Obregón, Xochimilco, Tlalpan, Milpa Alta, Cuajimalpa de Morelos y Tláhuac (Fig. 18 y 22), el E2 cuantifica 752.64 km² (Tabla 7), 30 km² más que el E1, que se dará en Xochimilco, Tláhuac, Tlalpan, Milpa Alta y Álvaro Obregón (Fig. 20 y 23; Anexo 10).

Lo anterior hace notar que hay un cambio en la dirección del crecimiento, ya que mientras en el E1 las delegaciones con mayor incremento son Álvaro Obregón, Xochimilco y Tlalpan, en el E2 son Xochimilco, Tláhuac y Tlalpan, dándose en ambos casos por la extensión de la periferia (Fig. 22 y 23).

Esta diferencia en el crecimiento se debe a la restricción que les confiere el OET del Distrito Federal a las áreas de conservación y protección, lo cual nos indica que para el 2020, las zonas sin protección que hasta este momento eran factibles de colonizar, han sido invadidas por los asentamientos humanos, provocando el poblamiento de las superficies restringidas por las políticas ambientales.

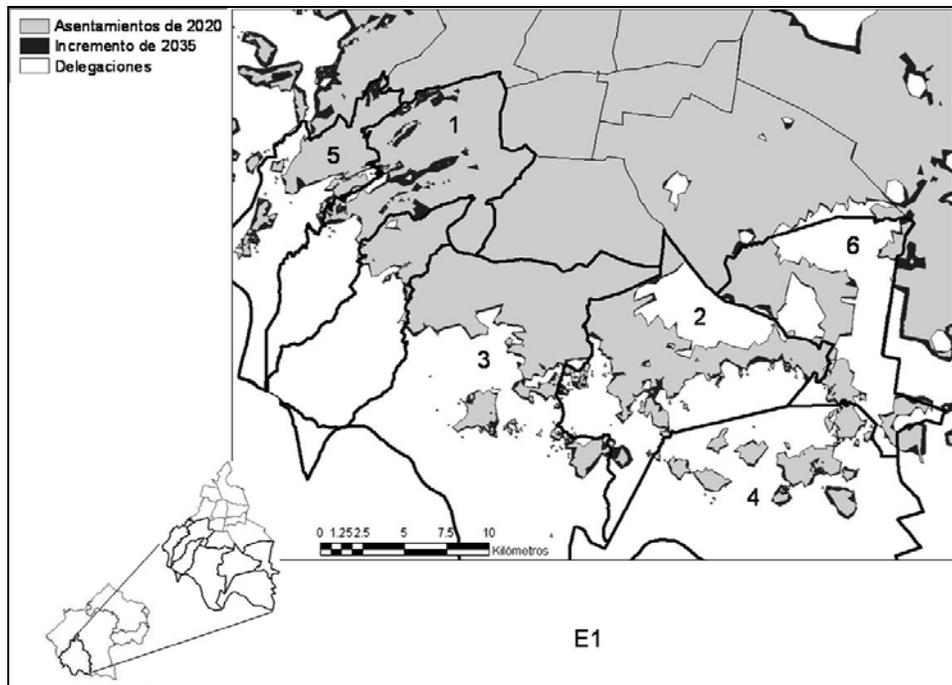


Fig. 22. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. 1. E1: escenario 1. Álvaro Obregón, 2. Xochimilco, 3. Tlalpan, 4. Milpa Alta, 5. Cuajimalpa de Morelos y 6. Tláhuac.

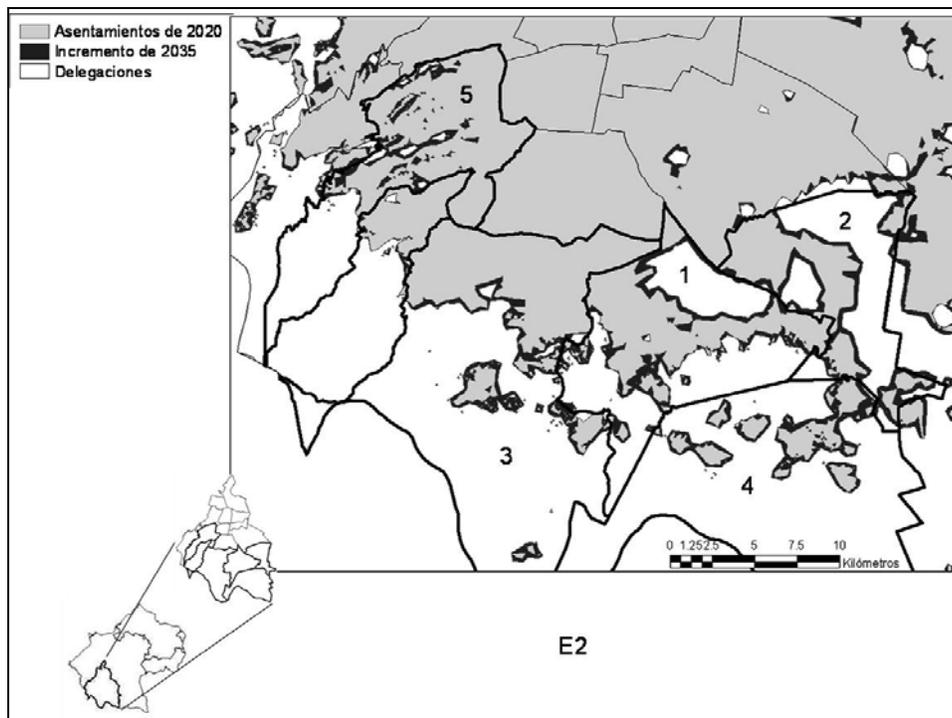


Fig. 23. Delegaciones del D. F. con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH. 1. E2: escenario 2. Xochimilco, 2. Tláhuac, 3. Tlalpan, 4. Milpa Alta y 5. Álvaro Obregón.

8.1.3 Crecimiento en el Estado de México

8.1.3.1 Crecimiento de 1985 a 2008

En 1985 en el Estado de México los asentamientos humanos ocupaban 572.1 km² y en 1995 841.74 km², lo que indica un incremento de 269.63 km², el mayor registrado en el periodo estudiado (1985-2008; Tabla 8)

Tabla 8. Superficie de los asentamientos humanos del Estado de México de 1985 a 2008.

Año	Edo. México		Incremento/periodo	
	Superficie km ²	%	km ²	%
1985	572.1	11.7	s/d	s/d
1995	841.74	17.2	269.63	5.5
2001	911.83	18.6	70.09	1.4
2008	1042.71	21.3	130.87	2.7

s/d: sin datos

De 1985 a 1995, Ecatepec de Morelos fue el municipio que registró mayor incremento (27.74 km²), seguido de Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli, Chimalhuacán, Naucalpan de Juárez, Chalco y Texcoco que presentaron un incremento superior a los 10 km² (Fig. 24 y 25; Anexo 11).

Lo anterior concuerda con lo encontrado por Negrete (2001, citado por Villarreal y Aguirre, 2003) quien comenta que de 1970 a 1990 se movilizaron 505,834 personas del Distrito Federal a los municipios conurbados. Entre 1985-1990, Chalco y Ecatepec recibieron el 13.4% y el 30% de éstas, respectivamente; en cambio, sólo 80,905 habitantes se trasladaron de los municipios a las delegaciones.

También coincide con lo expuesto por Villarreal y Aguirre, 2003 quienes mencionan que Chimalhuacán, Chalco-Solidaridad, Ixtapaluca y Cuautitlán Izcalli presentaron tasas de crecimiento que variaron entre 7 y 16% anual, muy por encima del promedio (2.5%).

Los municipios antes mencionados a excepción de Texcoco, se encuentran en la ZMCM establecida en 1980 (Fig. 11).

Aunque ningún municipio ha sido cubierto al 100% por los asentamientos humanos, dos han sobrepasado el 80% en este periodo (Tlanepantla de Baz con 89.4% y Jaltenco con 87.9%), Chiconcuac y Nezahualcóyotl tuvieron más del 70% (Anexo 11).

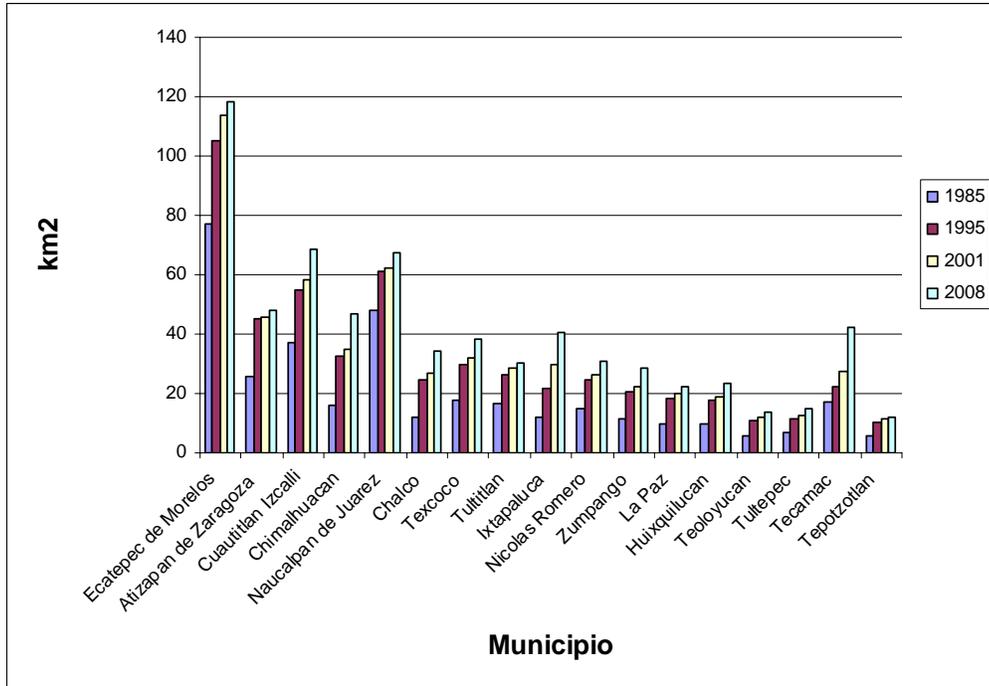
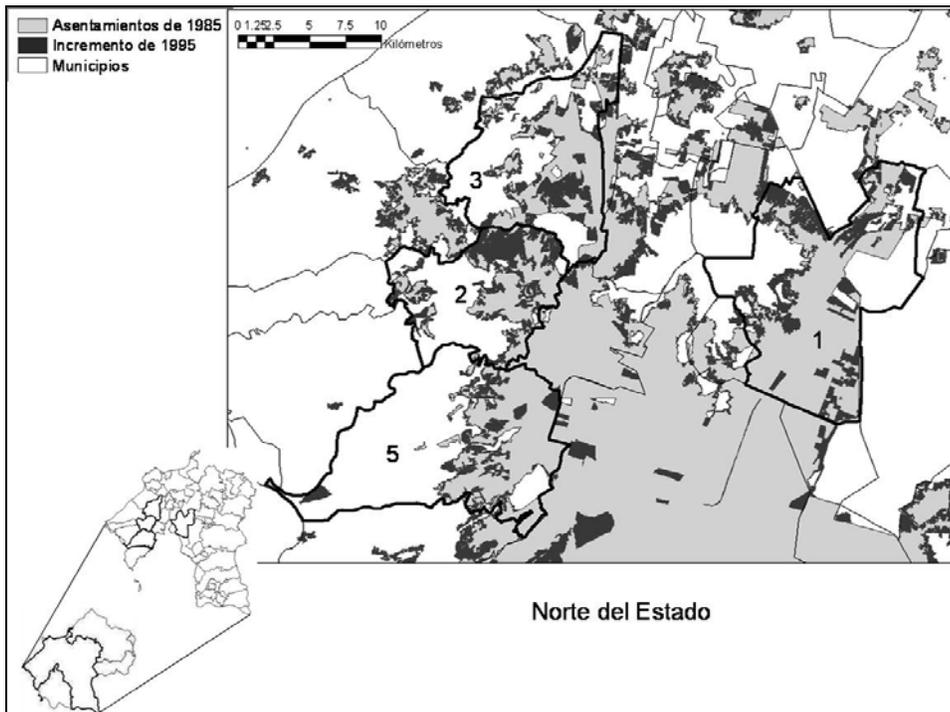


Fig. 24. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios del Estado de México. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 1985-1995.



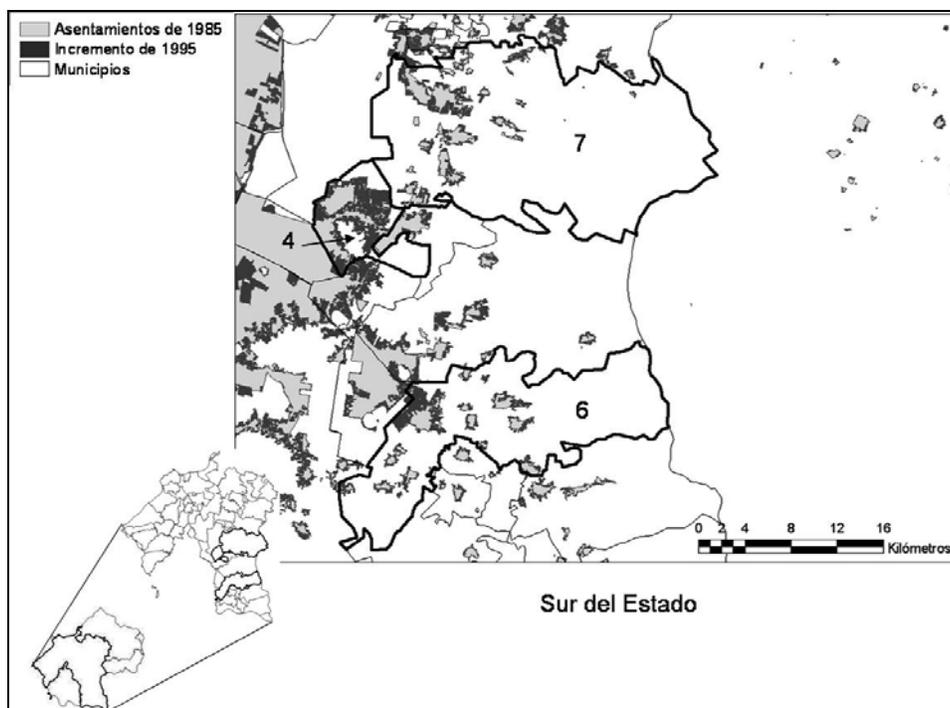


Fig. 25. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995. Norte y sur del estado. 1. Ecatepec de Morelos, 2. Atizapán de Zaragoza, 3. Cuautitlán Izcalli, 4. Chimalhuacán, 5. Naucalpan de Juárez, 6. Chalco y 7. Texcoco.

De 1995-2001 los asentamientos humanos abarcaron una superficie de 841.74 km² ocupando el 18.6% del Estado de México, presentando el menor incremento de los periodos estudiados (Tabla 8). Los municipios que tuvieron mayor crecimiento al Norte fueron Ecatepec de Morelos (8.3 km²), Coacalco de Berriozabal (5.75 km²), Tacamac (5.52 km²), Teotihuacan (2.34 km²) y Cuautitlán Izcalli (3.59 km²); y al Sureste Ixtapaluca (7.74 km²), Chalco (2.63 km²), Texcoco (2.54 km²) y La Paz (2.05 km²; Anexo 11, Fig. 24).

El crecimiento se da tanto por la expansión de los asentamientos humanos hacia la periferia como por la creación de nuevos asentamientos (Fig. 26).

Comparando el periodo 1985-1995 con 1995-2001, en el Estado de México se observa un cambio en la dinámica de crecimiento de los municipios, principalmente en Atizapán de Zaragoza, Chimalhuacán, Naucalpan de Juárez, Tultitlán, Coacalco de Berriozabal, Ixtapaluca, Tecamac y Teotihuacan (Fig. 24, 25 y 26).

De estos el que más destaca es Atizapán de Zaragoza, ya que de ocupar el 2° lugar al tener un incremento de 19.64 km² en 1995, pasó al 32° en 2001 al crecer sólo 0.55 km². Chimalhuacán, Naucalpan de Juárez y Tultitlán pasaron del 4°, 5° y 8° lugar al 10°, 18° y 21°, respectivamente (Fig. 24, Anexo 11).

Por otro lado, Coacalco de Berriozabal, Tecamac y Teotihuacan para 2001 figuraron dentro de los primeros lugares (2°, 4° y 8°) mientras que para 1995 ocuparon el 24°, 16° y 29°. De estos,

el único que presentó un incremento superior a 1 km² fue Coacalco de Berriozabal (de 3.35 km² en 1995 a 5.75 km² en 2001; Anexo 11).

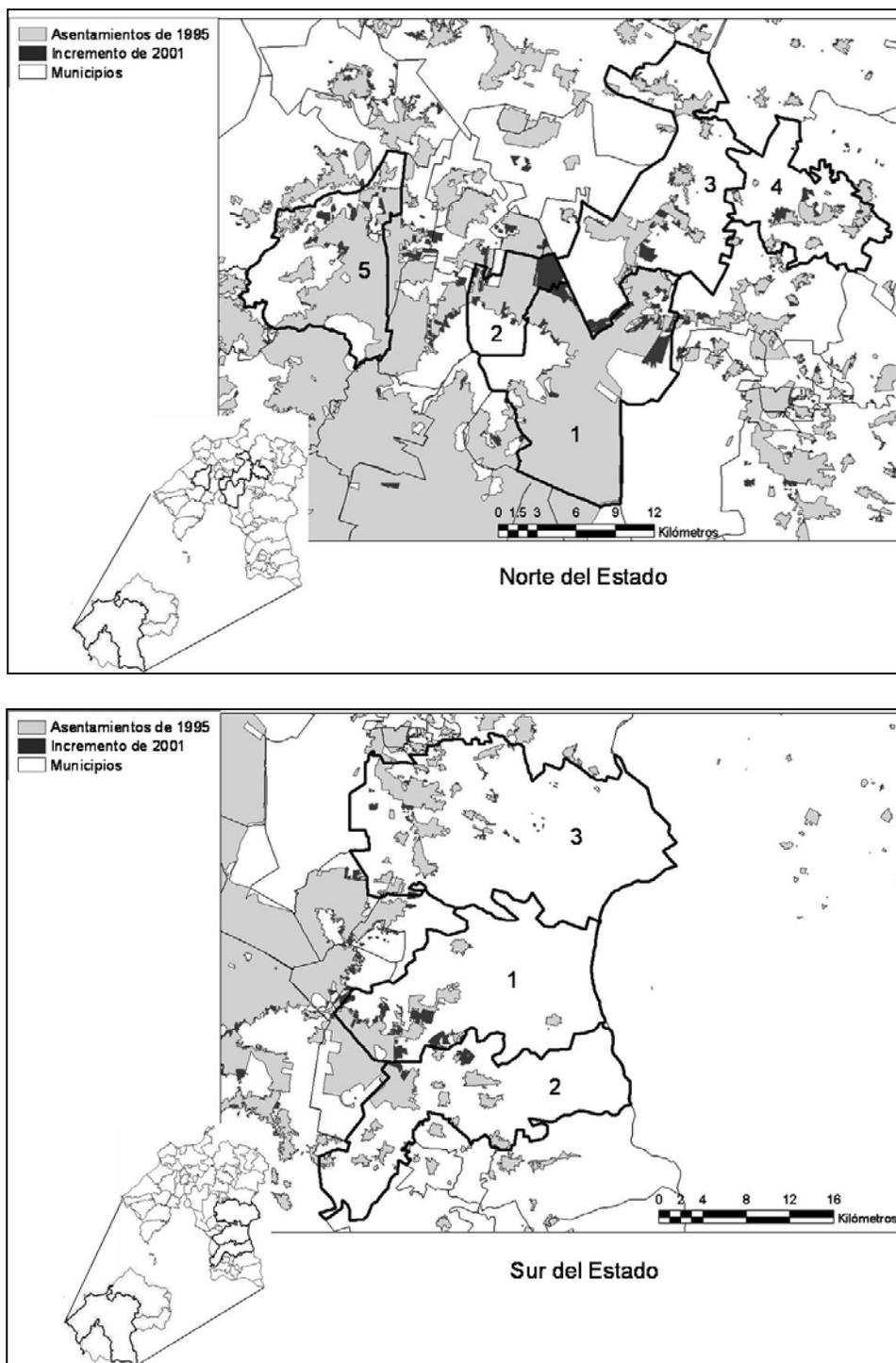
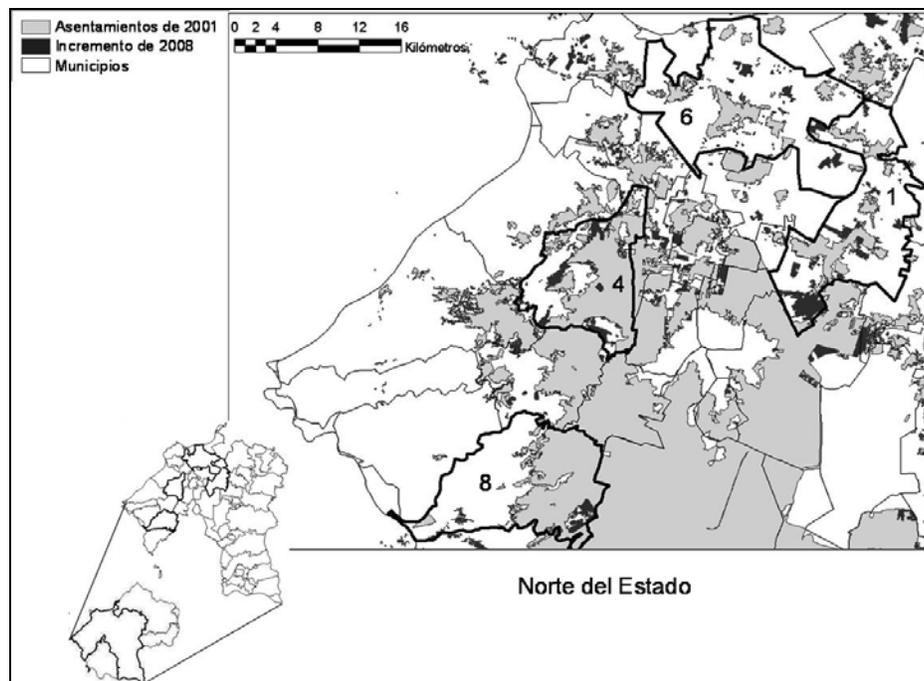


Fig. 26. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001. Norte y sur del estado. Norte: 1. Ecatepec de Morelos, 2. Coacalco de Berriozabal, 3. Tacamac, 4. Teotihuacan, 5. Cuautitlán Izcalli; Sur: 1. Ixtapaluca, 2. Chalco y 3. Texcoco.

Villarreal y Aguirre (2003) mencionan que de los seis ejes que se diseñaron para el Plan Metropolitano del Valle Cuautitlán-Texcoco, son el 1 y 6 los que tienen la mayor concentración del número de industrias y de personal empleado para 1998. Cuautitlán pertenece al 6 y Ecatepec, Tecamac y Teotihuacan al 1, también se encuentran cerca de la carretera Pachuca Hidalgo, donde se está conformando un corredor industrial. Esto podría ser la razón por la cual son los que tienen mayor crecimiento en este periodo.

En el periodo de 2001 a 2008, los asentamientos humanos abarcaron el 21.3% de la superficie del estado (1,042.71 km²; Tabla 8) habiendo un cambio en la dirección del crecimiento al darse hacia tres puntos: Noroeste, Suroeste y Sureste (Fig. 27), siendo los municipios de Tecamac, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Zumpango, Texcoco y Naucalpan de Juárez los que presentaron mayor incremento (Fig. 24, Anexo 11).

Texcoco y Zumpango presentaron la creación de nuevos centros de población, mientras que en el resto el crecimiento se dio por la expansión hacia la periferia de los asentamientos humanos (Fig. 27).



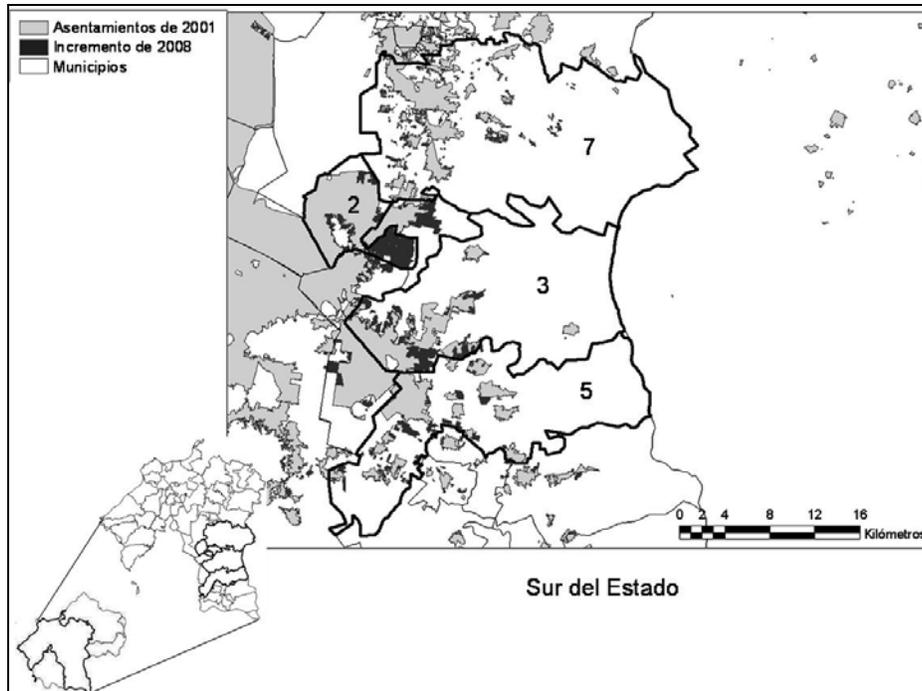


Fig. 27. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008. Norte y sur del estado. 1. Tecamac, 2. Chimalhuacán, 3. Ixtapaluca, 4. Cuautitlán Izcalli, 5. Chalco, 6. Zumpango, 7. Texcoco y 8. Naucalpan de Juárez.

8.1.3.2 Crecimiento modelado con SLEUTH

En el E1 entre 2008 y 2020 el 23.1% de la superficie del Estado de México quedó cubierta por los asentamientos humanos, 86.95 km² más que en 2008. En el E2 el área ocupada es menor (1112.17 km²; Tabla 9).

Tabla 9. Superficie de los asentamientos humanos en el Estado de México del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.

Estado de México					
Año	Superficie de la entidad km ²	E1		E2	
		km ²	%	km ²	%
2020	4,897.10	1,129.65	23.1	1,112.17	22.7
2035	4,897.10	1,551.14	31.7	1,531.13	31.3

E1: escenario 1; E2: escenario 2

En el E1 los asentamientos avanzaron hacia el Norte, Noroeste y Sureste (Fig. 28) al expandirse su periferia en los municipios de Tecamac, Texcoco, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Zumpango y Acolman (Fig. 29).

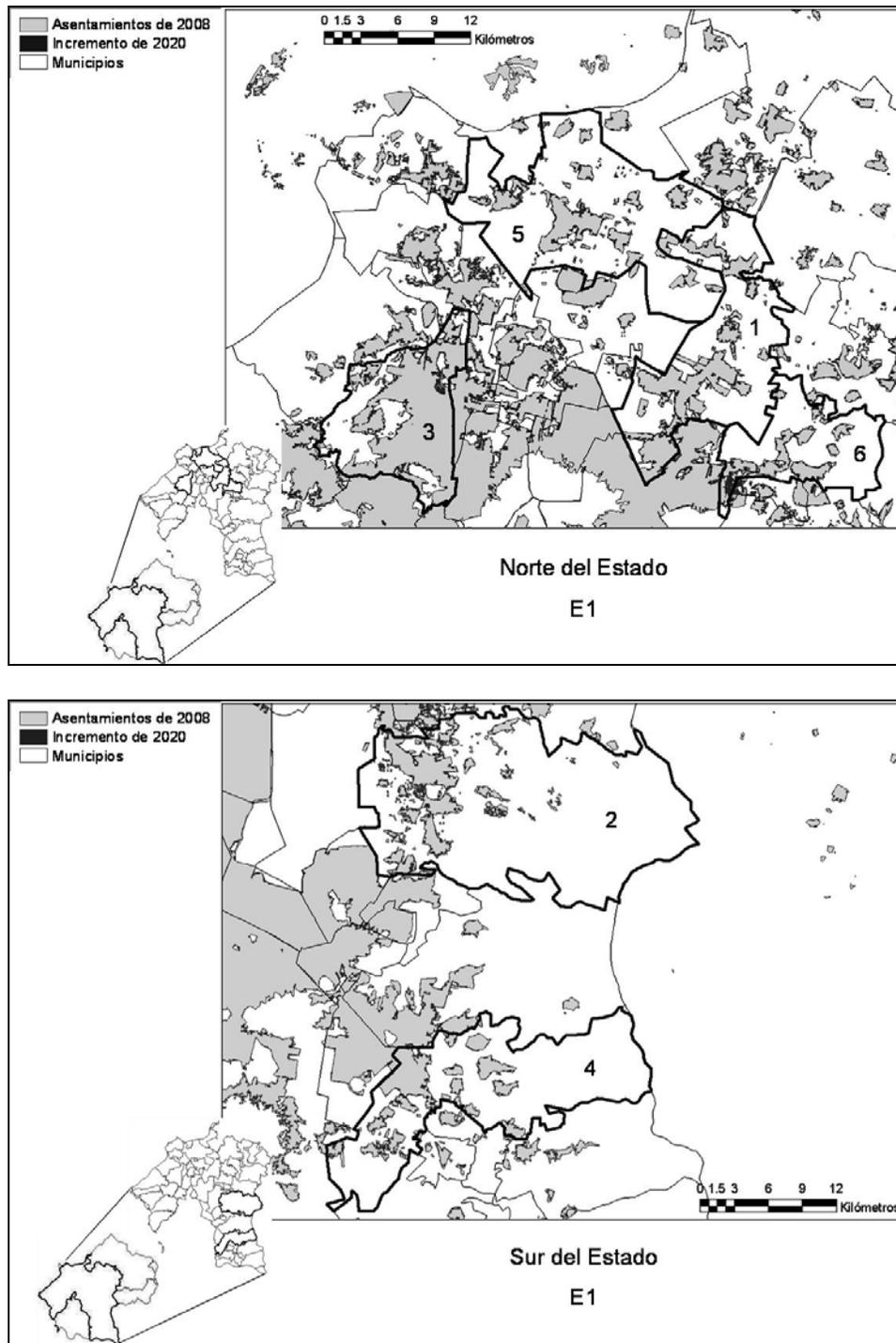


Fig. 28. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH. 1. Norte y sur del estado E1: escenario 1. Tecamac, 2. Texcoco, 3. Cuautitlán Izcalli, 4. Chalco, 5. Zumpango y 6. Acolman.

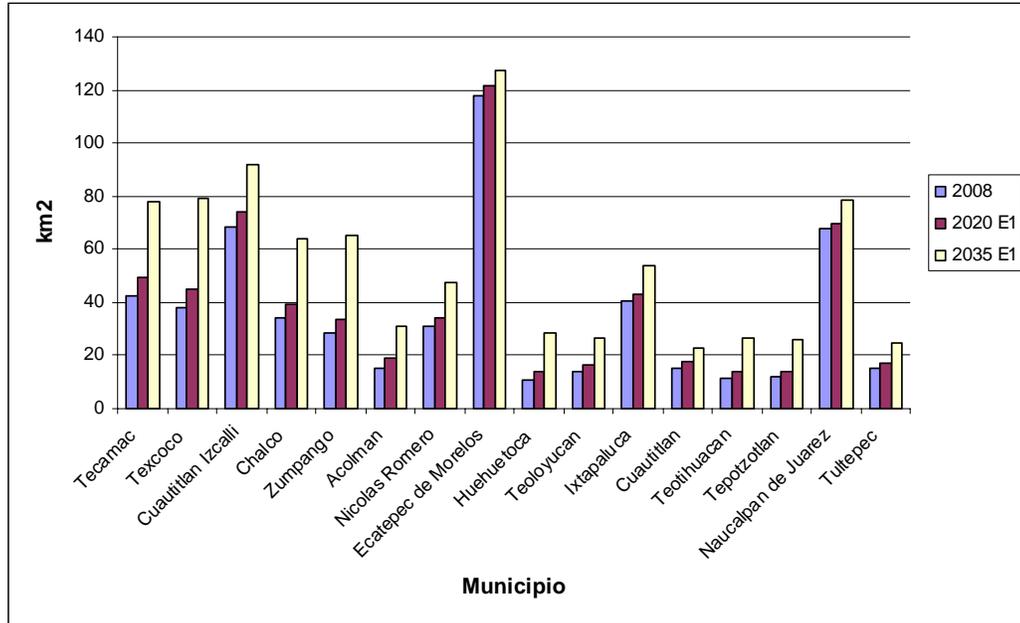


Fig. 29. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios del Estado de México. E1: escenario 1. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

En el segundo escenario crecieron hacia Tecamac, Texcoco, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Zumpango y Acolman (Fig. 30), es decir, hacia las mismas direcciones que en el primero (Fig. 31).

Suárez y Delgado (2007) encontraron que el crecimiento de los asentamientos humanos se dará principalmente en el sureste y noroeste de la ciudad, en los municipios del cuarto contorno. Los municipios con mayor crecimiento del presente trabajo, pertenecen al cuarto contorno de estos autores.

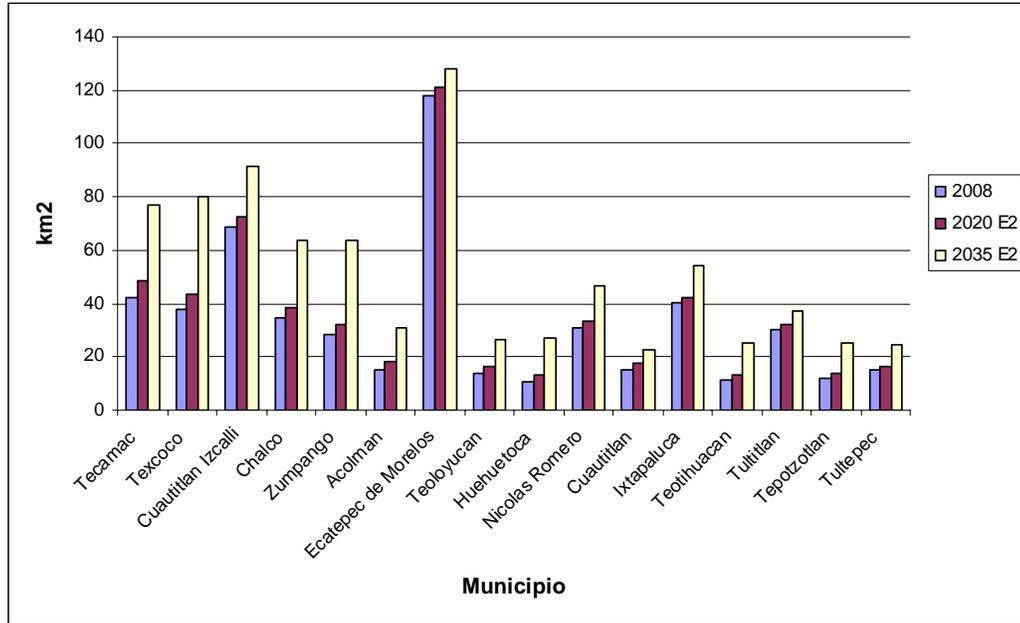
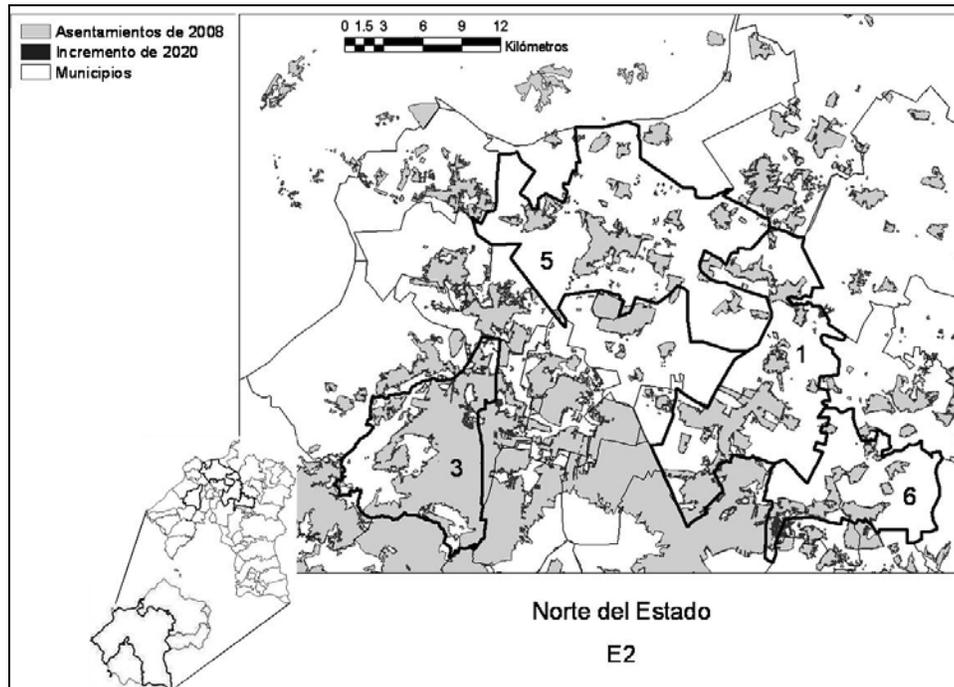


Fig. 30. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios del Estado de México. E2: escenario 2. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.



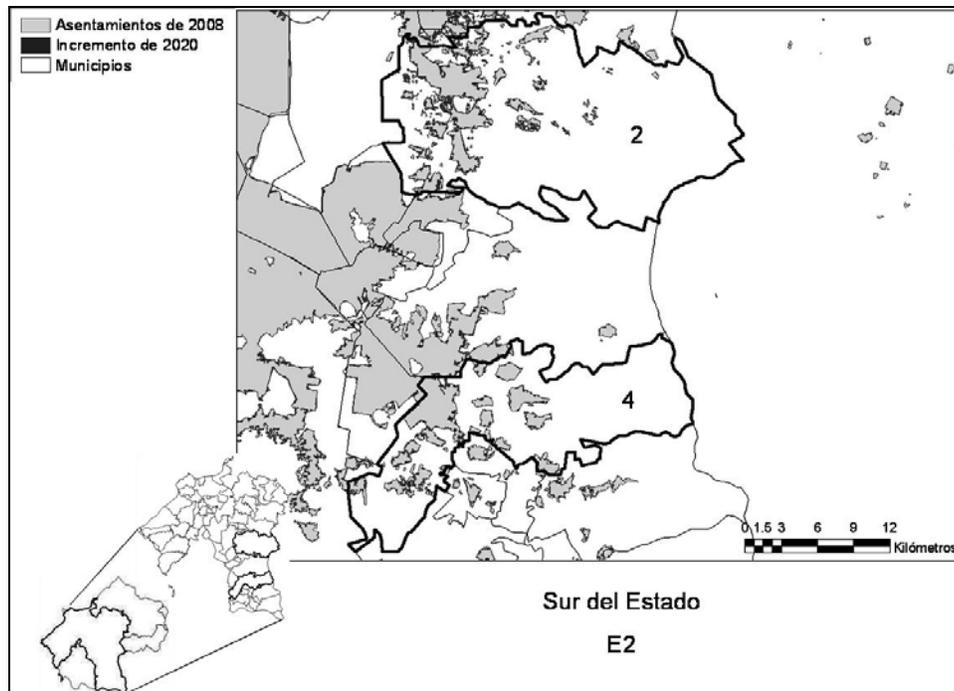


Fig. 31. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado. E2: escenario 2. 1. Tecamac, 2. Texcoco, 3. Cuautitlán Izcalli, 4. Chalco, 5. Zumpango y 6. Acolman.

En el periodo 2020-2035 la diferencia entre ambos escenarios es de alrededor de 3 km², siendo superior en el E1 (Tabla 9) lo cual indica que en este estado todavía hay áreas sin restricciones que son adecuadas (baja pendiente, red de caminos que permitan acceder a ellas) para el establecimiento de asentamientos humanos.

En el E1 el crecimiento se predijo hacia el Norte, Noroeste y Sureste del Estado de México, en los municipios de Texcoco, Zumpango, Tecamac, Chalco, Cuautitlán Izcalli, Huehuetoca, Nicolás Romero, Teotihuacan, Acolman, Tepotzotlán, Atizapán de Zaragoza, Temascalpa, Otumba, Ixtapaluca, Axapusco, Huixquilucan y Teoloyucan (Fig. 30 y 32).

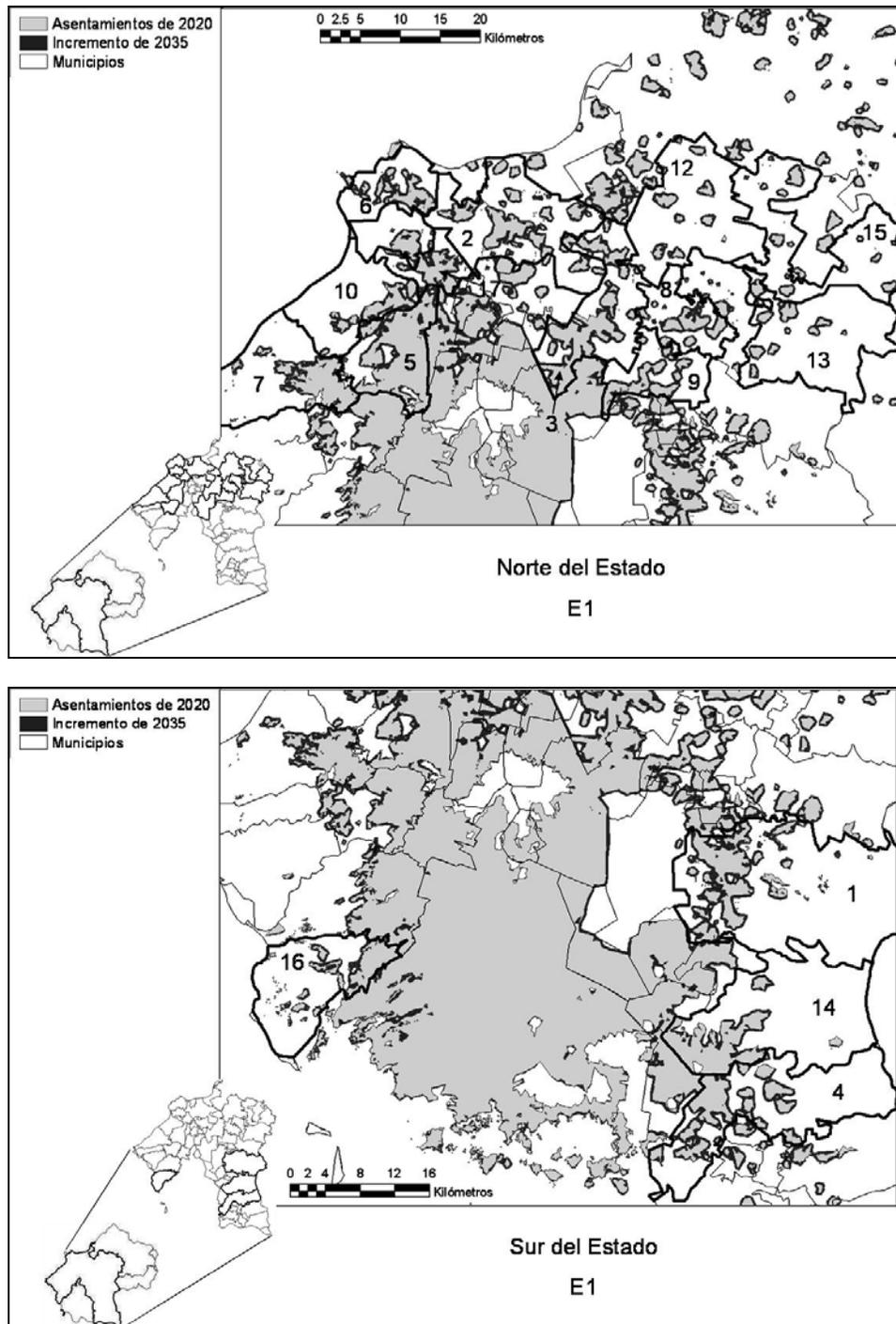


Fig. 32. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado. 1. E1: escenario 1. Texcoco, 2. Zumpango, 3. Tecamac, 4. Chalco, 5. Cuautitlán Izcalli, 6. Huehuetoca, 7. Nicolás Romero, 8. Teotihuacán, 9. Acolman, 10. Tepotzotlán, 11. Atizapán de Zaragoza, 12. Temascalpa, 13. Otumba, 14. Ixtapaluca, 15. Axapusco, 16. Huixquilucan y 17. Teoloyucan.

En el E2 también se predijo hacia las mismas direcciones pero en diferentes proporciones creciendo hacia Texcoco, Zumpango, Tecamac, Chalco, Cuautitlán Izcalli, Huehuetoca,

Nicolás Romero, Acolman, Ixtapaluca, Teotihuacán, Teoloyucan, Tepotzotlán, Temascalpa, Otumba, Axapusco, Naucalpan de Juárez y Ecatepec (Fig. 30 y 33).

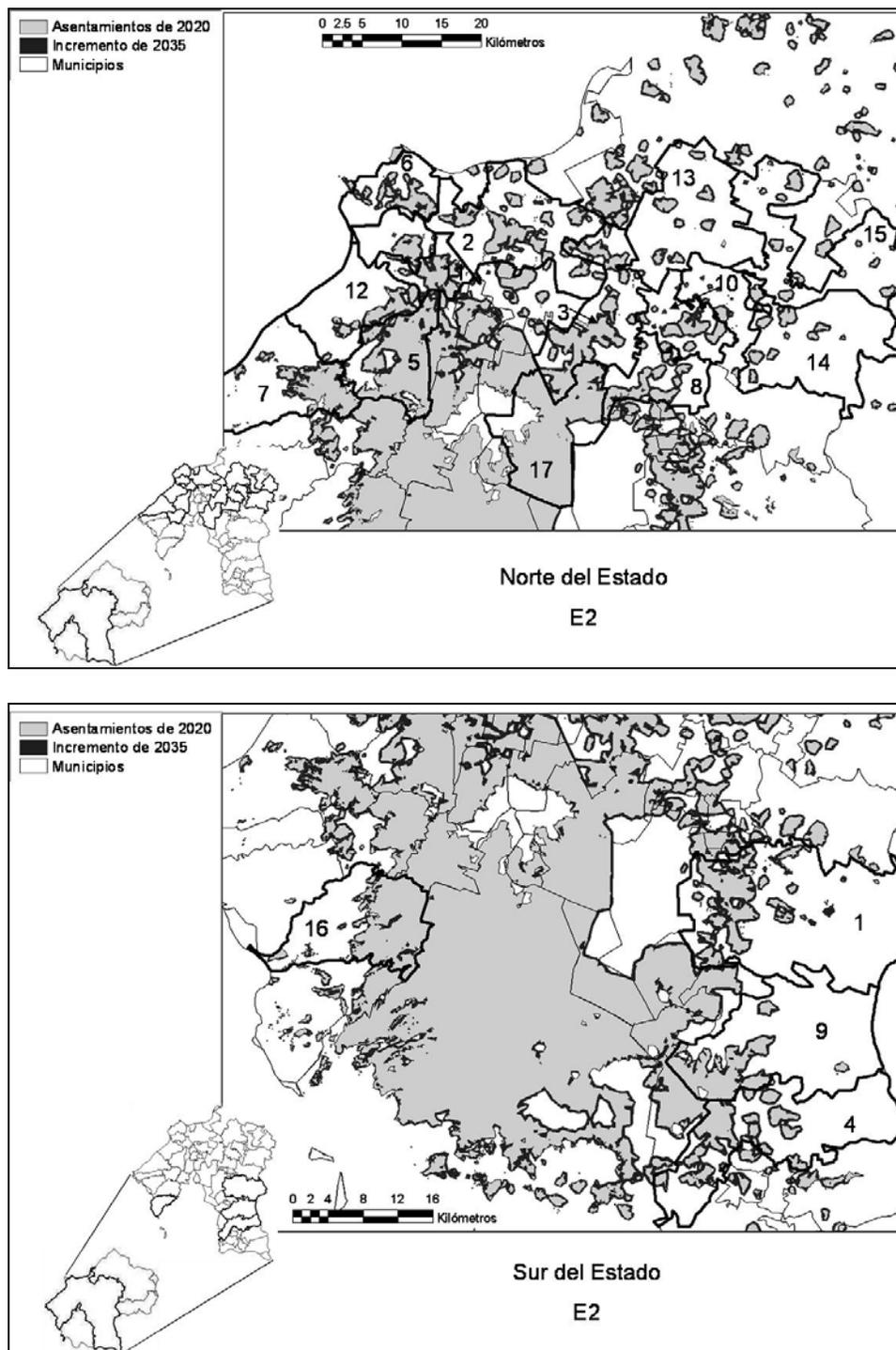


Fig. 33. Municipios del Estado de México con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH. Norte y sur del estado. E2: escenario 2. 1. Texcoco, 2. Zumpango, 3. Tecamac, 4. Chalco, 5. Cuautitlán Izcalli, 6. Huehuetoca, 7. Nicolás Romero, 8. Acolman, 9. Ixtapaluca, 10. Teotihuacán, 11. Teoloyucan, 12. Tepotzotlán, 13. Temascalpa, 14. Otumba, 15. Axapusco, 16. Naucalpan de Juárez y 17. Ecatepec.

8.1.4 Crecimiento en Hidalgo

8.1.4.1 Crecimiento de 1985 a 2008

De los estados que no conforman la ZMCM, el que sigue en crecimiento en el periodo de 1985 a 1995 es Hidalgo (de 1985 a 1995 los asentamientos humanos avanzaron 47.25 km²; Tabla 10) siendo los municipios de Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Tizayuca, Tepeapulco, Zempoala, Apan y Zapotlán de Juárez los que presentan mayor incremento (Fig. 34 y 35). De estos cabe destacar Pachuca de Soto, ya que casi se triplicó el área (de 11.02 km² a 32.79 km²) aumentando 21.76 km² (Anexo 13), 6 km² menos que Ecatepec (Anexo 11), ocupando el 2° lugar en incremento de toda la Cuenca de México.

Tabla 10. Superficie de los asentamientos humanos en Hidalgo de 1985 a 2008.

Hidalgo				
Año	Superficie de asentamientos		Incremento/periodo	
	km ²	%	km ²	%
1985	52.8	2.1	s/d	s/d
1995	100.05	3.9	47.25	1.8
2001	112.64	4.4	12.59	0.5
2008	144.38	5.6	31.74	1.2

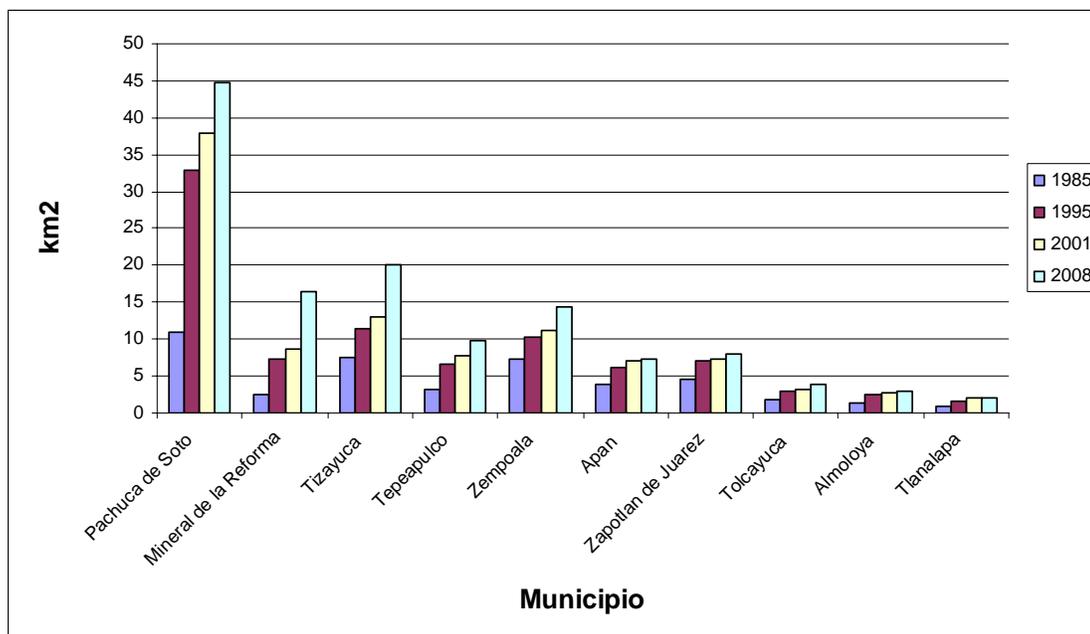


Fig. 34. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios de Hidalgo. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 1985-1995.

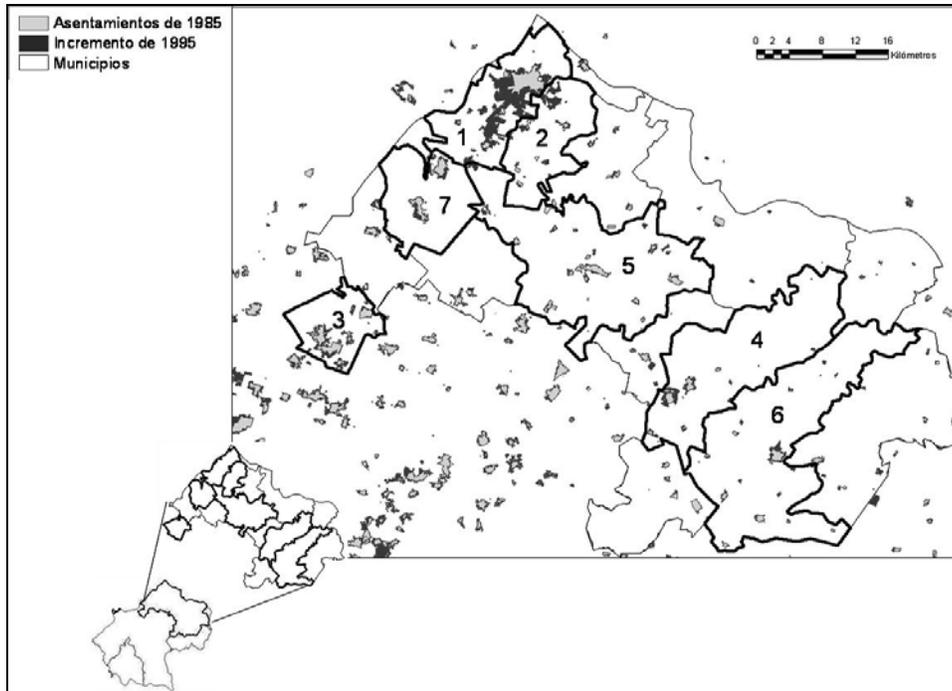


Fig. 35. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995. 1. Pachuca de Soto, 2. Mineral de la Reforma, 3. Tizayuca, 4. Tepeapulco, 5. Zempoala, 6. Apan y 7. Zapotlán de Juárez.

Los municipios que mostraron mayor crecimiento de 1995-2001 fueron Pachuca de Soto (5.08 km²), Tizayuca, Mineral de la Reforma, Tepeapulco y Zempoala (de 1.4 a 1 km²; Fig. 18, Anexo 13).

El crecimiento se da con la expansión de los asentamientos humanos hacia la periferia sin aparición de nuevos centros de población (Fig. 35).

De 1995 a 2001 se registra el menor incremento de los periodos estudiados (12.59 km²; Tabla 10), habiendo una modificación en la dinámica de crecimiento con respecto a 1985-1995, al ocupar Tizayuca el 2° lugar y Mineral de la Reforma el tercero (en el periodo anterior estaban invertidos; Fig. 34). De estos municipios, Tizayuca se encuentra cerca del área conurbada y los otros 3 cerca de Pachuca, esto podría explicar su crecimiento (Fig. 11 y 36).

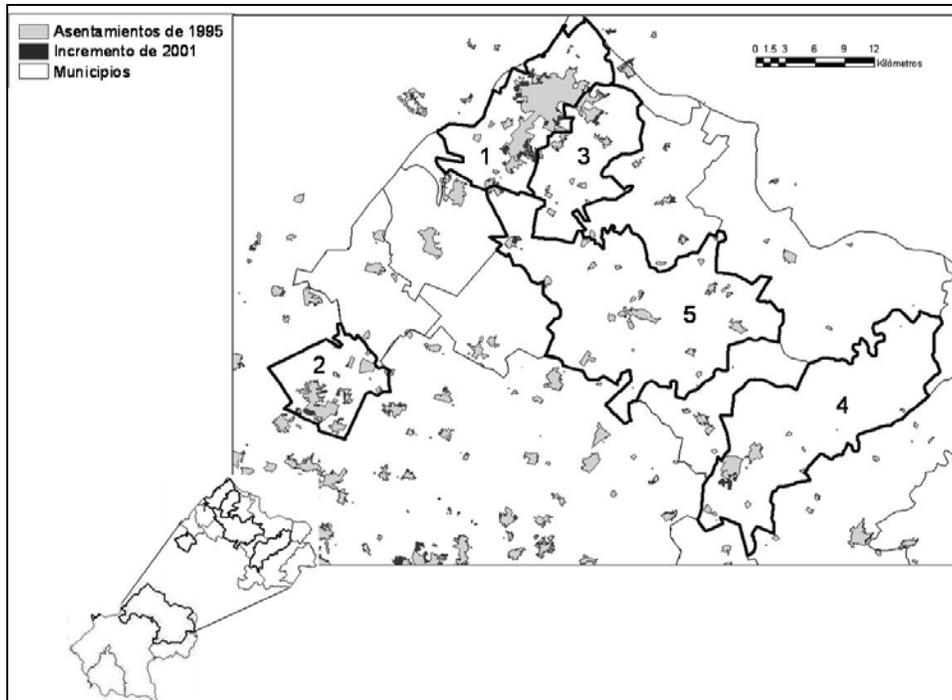


Fig. 36. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001. Los municipios están numerados de mayor a menor incremento. 1. Pachuca de Soto, 2. Tizayuca, 3. Mineral de la Reforma, 4. Tepeapulco y 5. Zempoala.

De 2001-2008 los asentamientos ocuparon una superficie de 144.38 km², 31.74 km² más que el periodo anterior (Tabla 10). Los municipios con mayor crecimiento fueron Mineral de la Reforma, Tizayuca, Pachuca de Soto, Zempoala y Tepeapulco (Fig. 34, Anexo 13).

En este periodo Pachuca de Soto es desplazado por Mineral de la Reforma y Tizayuca al presentar los dos últimos mayor incremento que el primero (Fig. 34, Anexo 13).

El crecimiento en este estado se caracteriza por la expansión de los asentamientos humanos en Pachuca de Soto y por la aparición de nuevos centros de población en Mineral de la Reforma, Zempoala y Tepeapulco (Fig. 37).

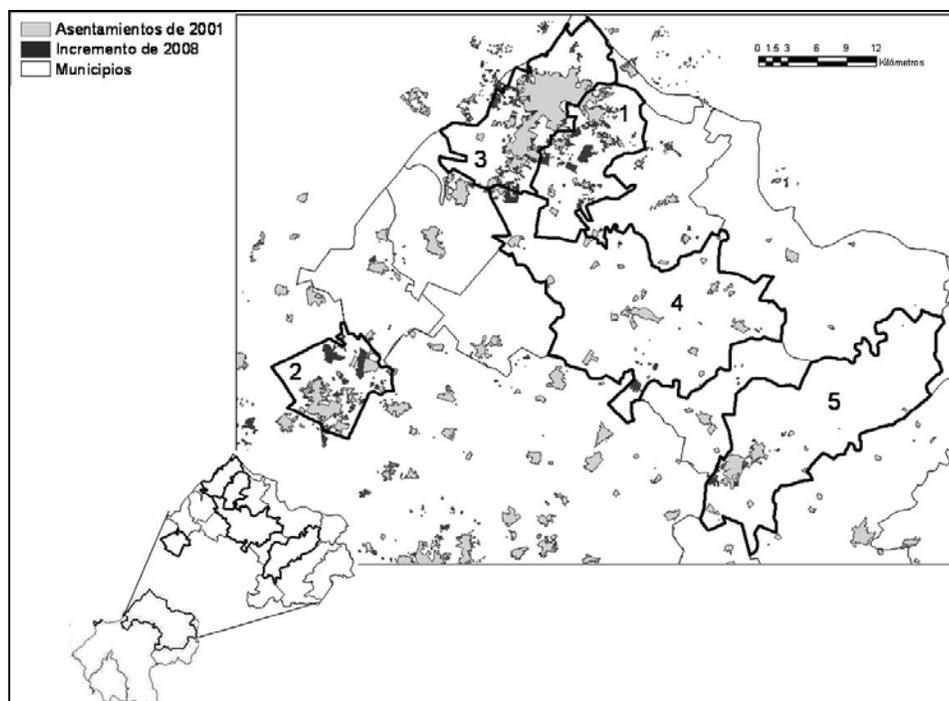


Fig. 37. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008. 1. Mineral de la Reforma, 2. Tizayuca, 3. Pachuca de Soto, 4. Zempoala y 5. Tepeapulco.

8.1.4.2 Crecimiento modelado con SLEUTH

De 2008-2020 los asentamientos humanos abarcaron una superficie de 164.07 km² en el E1 y 160.17 km² en el E2, siendo superior el E1 (Tabla 11) lo que indica que todavía existen áreas sin restricciones que pueden ser invadidas por estos.

Tabla 11. Superficie de los asentamientos humanos en Hidalgo del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.

Hidalgo					
Año	Superficie de la entidad km ²	E1		E2	
		km ²	%	km ²	%
2020	2557.56	164.07	6.4	160.17	6.3
2035	2557.56	294.24	11.5	288.75	11.3

E1: escenario 1; E2: escenario 2

En el E1, el crecimiento se dio por la expansión de la periferia de los asentamientos humanos (Fig. 38), en los municipios de Pachuca de Soto, Tizayuca, Mineral de la Reforma, Zempoala y Tepeapulco (Fig. 39).

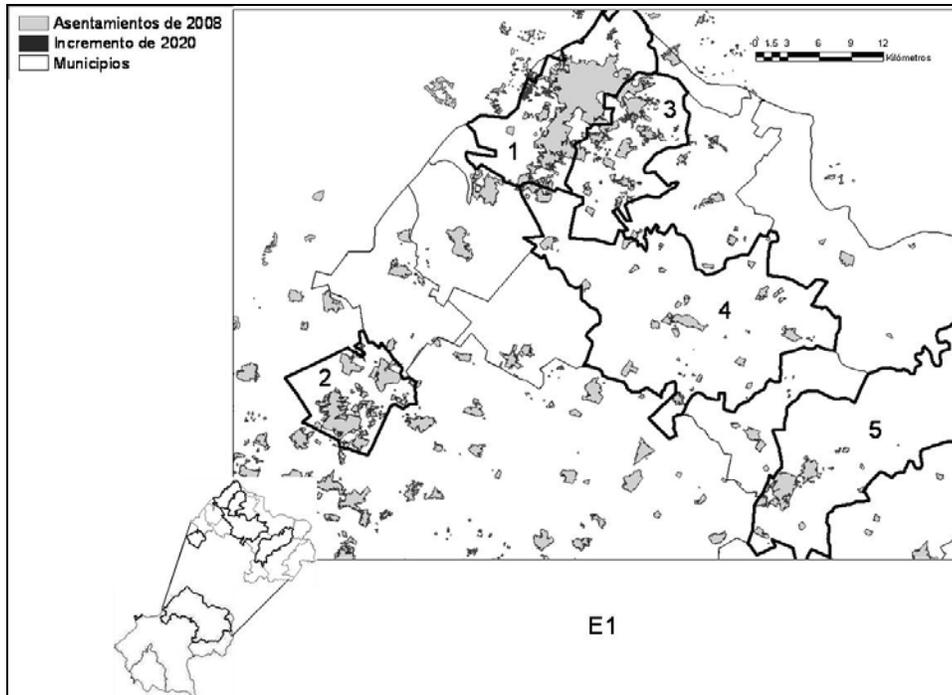


Fig. 38. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH. 1. E1: escenario. 1. Pachuca de Soto, 2. Tizayuca, 3. Mineral de la Reforma, 4. Zempoala y 5. Tepeapulco.

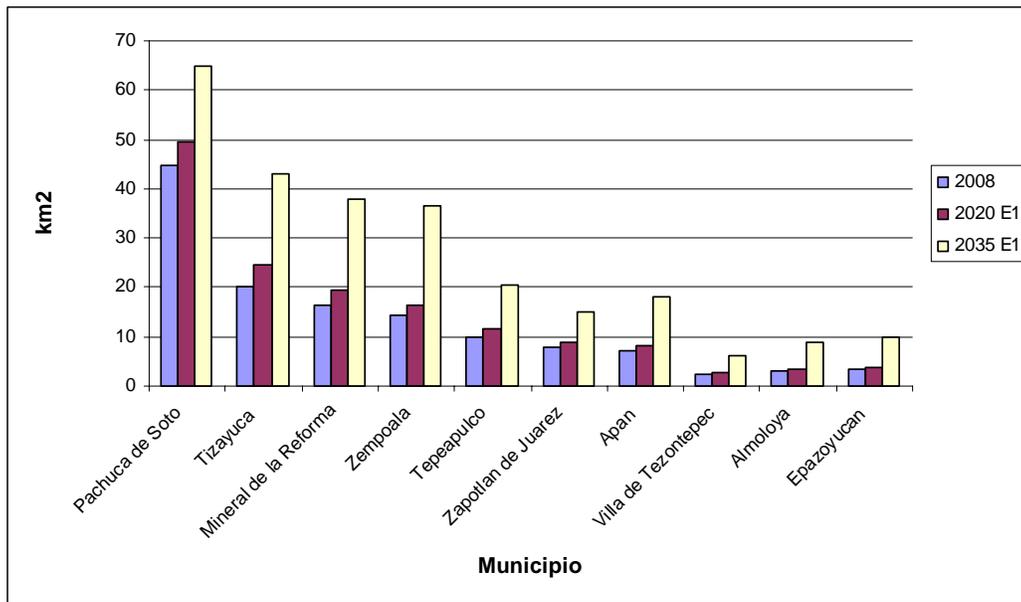


Fig. 39. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Hidalgo. E1: escenario 1. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

En el E2 el crecimiento también fue por la expansión de los asentamientos de la periferia hacia fuera (Fig. 40), principalmente en los municipios de Tizayuca, Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Zempoala y Tepeapulco (Fig. 41).

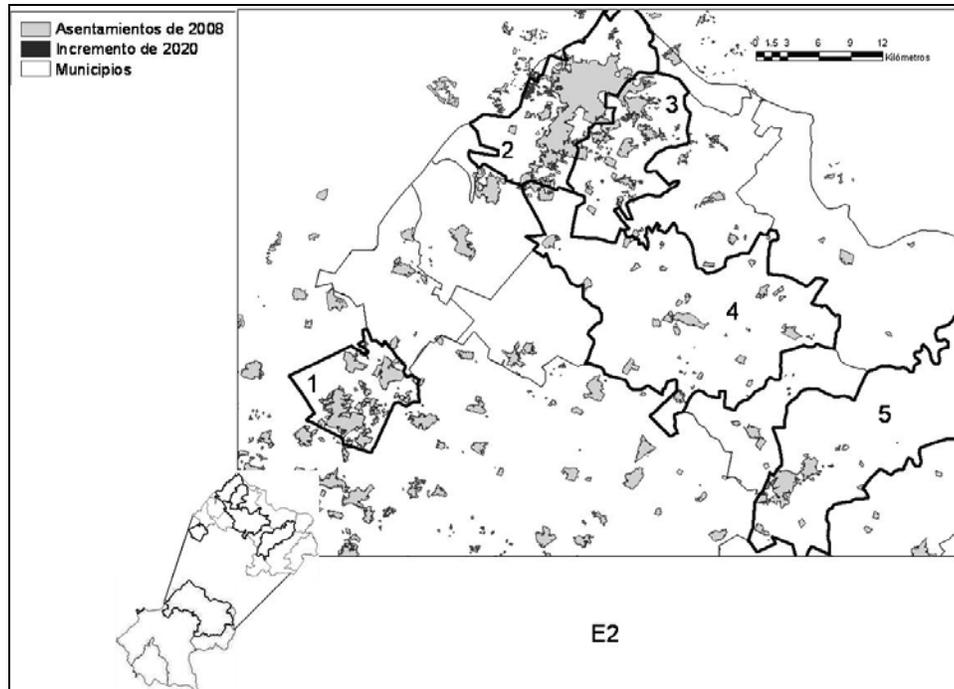


Fig. 40. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH. E2: escenario 2. 1. Tizayuca, 2. Pachuca de Soto, 3. Mineral de la Reforma, 4. Zempoala y 5. Tepeapulco.

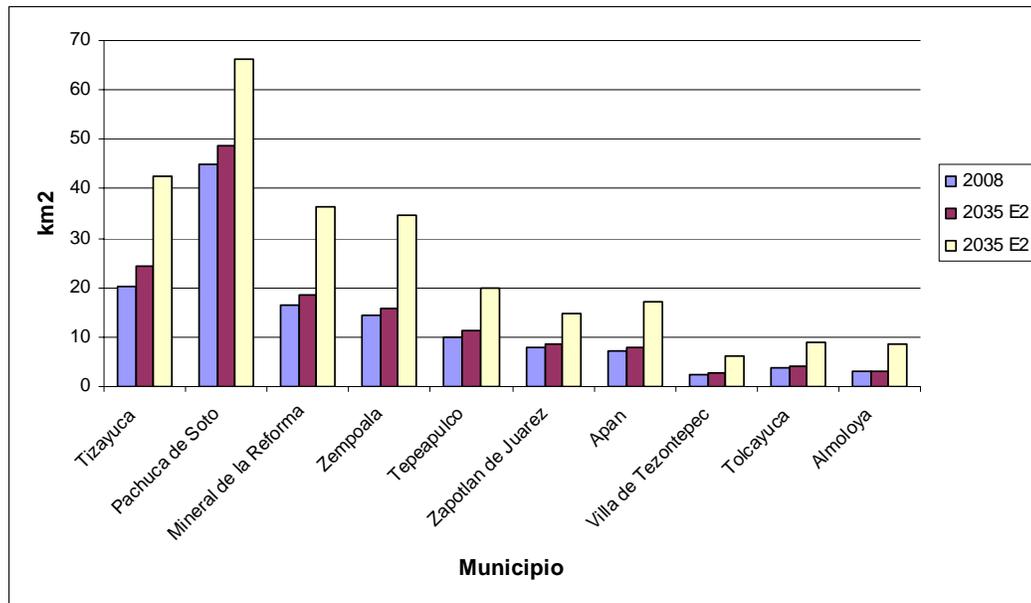


Fig. 41. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Hidalgo. E2: escenario 2. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

En ambos escenarios el crecimiento se da hacia el Noreste de la cuenca aunque en mayor proporción en Pachuca en el E1 y en Tizayuca en el E2.

En el periodo 2020-2035, en el E1 los asentamientos tuvieron un incremento de 130 km² ocupando una superficie de 294.24 km² y en el E2 crecieron 128 km² abarcando un área de 288.75 km².

El crecimiento del E1 se dio en los municipios de Zempoala, Tizayuca, Mineral de la Reforma, Pachuca de Soto, Apan, Tepeapulco, Zapotitlán de Juárez y Epazoyucan (Fig. 42; Anexo 14).

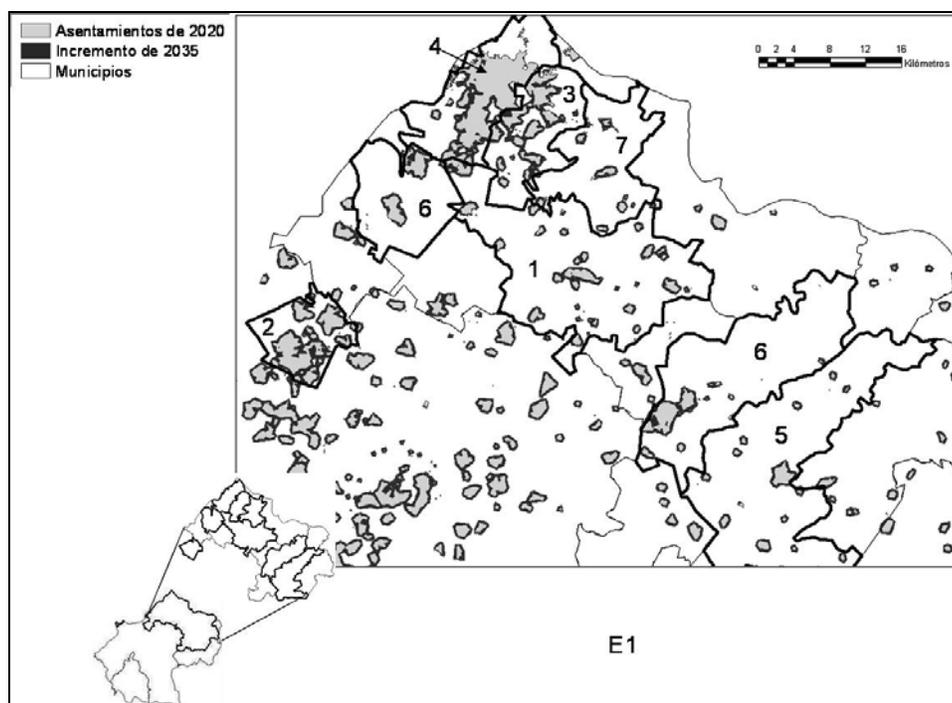


Fig. 42. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. E1: escenario 1. 1. Zempoala, 2. Tizayuca, 3. Mineral de la Reforma, 4. Pachuca de Soto, 5. Apan, 6. Tepeapulco, 7. Zapotitlán de Juárez y 8. Epazoyucan.

En el E2, los asentamientos humanos avanzaron hacia la periferia (Fig. 43) en los municipios de Zempoala, Tizayuca, Mineral de la Reforma, Pachuca de Soto, Apan, Tepeapulco, Zapotitlán de Juárez y Epazoyucan (Fig. 43; Anexo 13)

El que el crecimiento en el E1 haya sido superior que en el E2 indica que para 2035 todavía existen áreas sin restricciones que pueden ser invadidas por los asentamientos humanos.

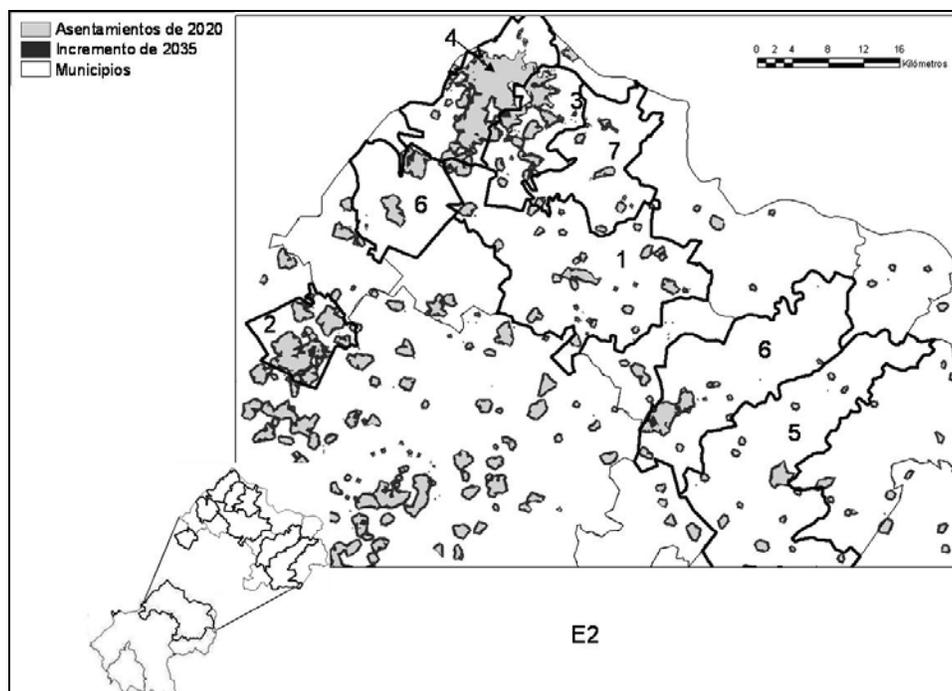


Fig. 43. Municipios de Hidalgo con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E2 modelado con SLEUTH. E2: escenario 2. 1. Zempoala, 2. Tizayuca, 3. Mineral de la Reforma, 4. Pachuca de Soto, 5. Apan, 6. Tepeapulco, 7. Zapotitlán de Juárez y 8. Epazoyucan.

8.1.5 Crecimiento en Tlaxcala y Puebla

8.1.5.1 Crecimiento de 1985 a 2008

Tlaxcala y Puebla fueron los estados que tuvieron menor crecimiento entre 1985 y 1995 (6.09 km² y 0.19 km², respectivamente; Tablas 12 y 13), siendo los municipios de Calpulalpan y Tlaxco los que tuvieron mayor incremento (Fig. 44; Anexo 15). Para Puebla, sólo el municipio de Chignahuapan presenta asentamientos humanos los cuales abarcan 1.03 km² para 1995 (Anexo17; Fig. 45)

Tabla 12. Superficie de los asentamientos humanos en Tlaxcala de 1985 a 2008.

Tlaxcala				
Año	Superficie		Incremento/periodo	
	km ²	%	km ²	%
1985	8.35	1.7	s/d	s/d
1995	14.43	1.8	6.09	0.8
2001	15.95	2	1.52	0.2
2008	16.6	2.1	0.66	0.1

Tabla 13. Superficie de los asentamientos humanos en Puebla de 1985 a 2008.

Puebla				
Año	Superficie		Incremento/periodo	
	km ²	%	km ²	%
1985	0.84	1	s/d	s/d
1995	1.03	1.2	0.19	0.2
2001	1.2	1.4	0.17	0.2
2008	1.28	1.5	0.08	0.1

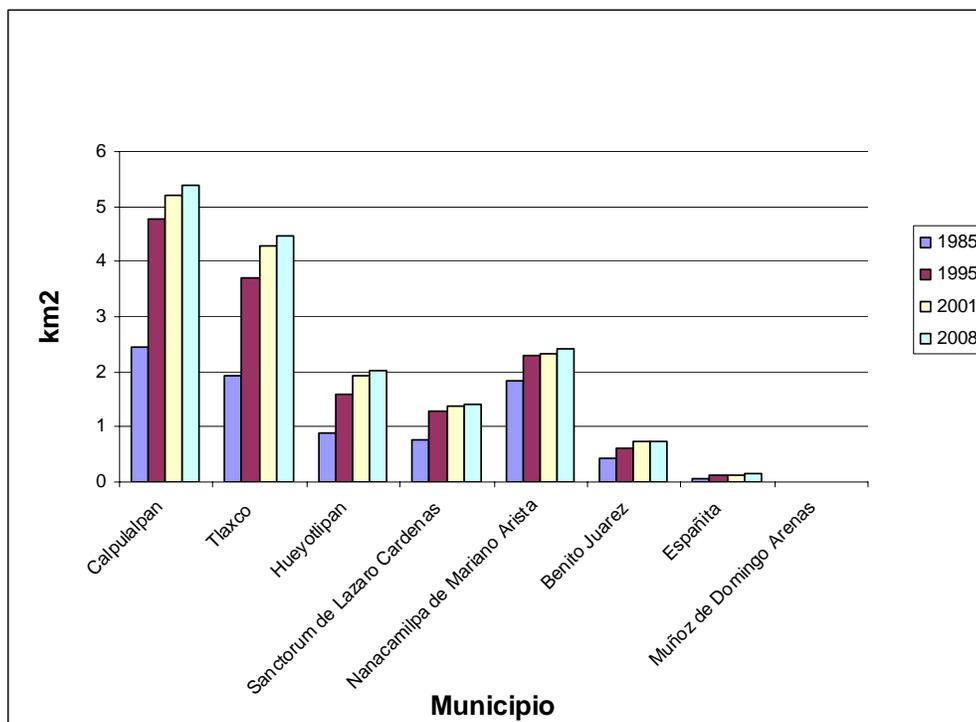


Fig. 44. Área de los asentamientos humanos de 1985 a 2008 en los municipios de Tlaxcala. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 1985-1995.

En el periodo de 1995-2001 Tlaxcala y Puebla nuevamente presentaron el menor crecimiento (1.52 km² y 0.17 km²; Tablas 12 y 13), siendo Calpulalpan y Tlaxco (Fig. 44) los municipios que tuvieron mayor incremento del primer estado y Chignahuapan que es el único que tiene asentamientos humanos del segundo (Anexo 15 y 17; Fig. 46)

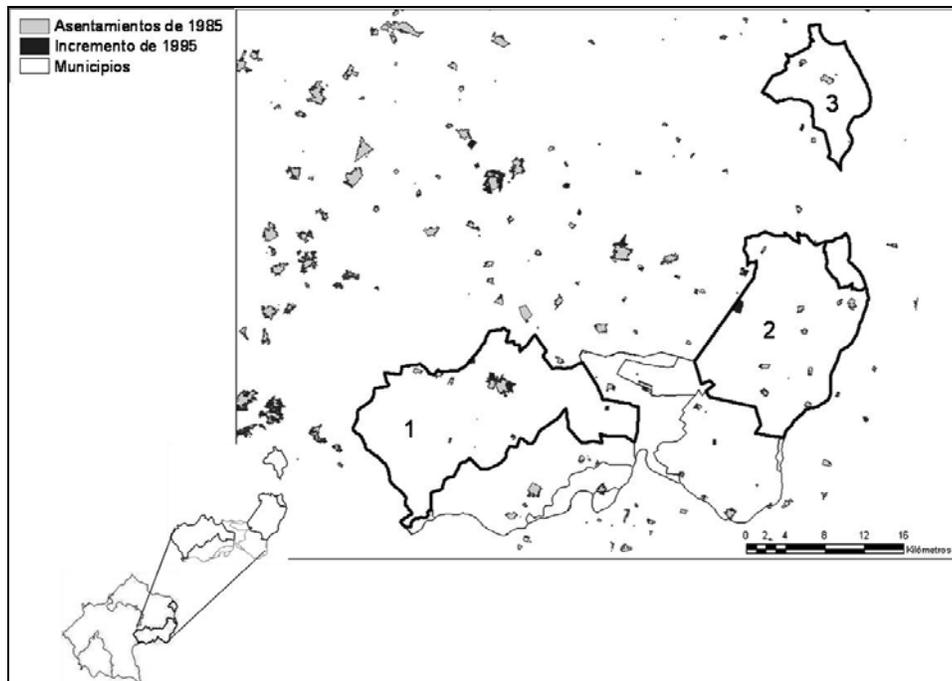


Fig. 45. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1985 a 1995. 1. Calpulalpan, 2. Tlaxco, 3. Chignahuapan.

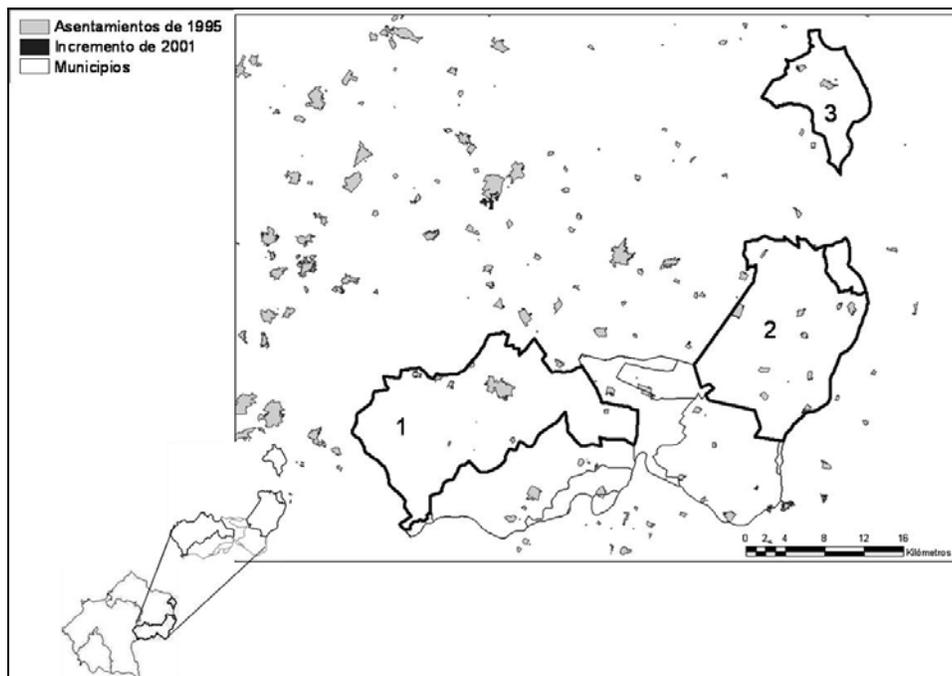


Fig. 46. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 1995 a 2001. 1. Calpulalpan, 2. Tlaxco, 3. Chignahuapan.

En el periodo 2001-2008 Tlaxcala y Puebla siguen presentando el menor crecimiento registrado en el intervalo de tiempo estudiado (0.66 km^2 y 0.08 km^2 ; Tablas 12 y 13).

Calpulalpan y Tlaxco invierten los lugares al presentar mayor incremento el primero (Fig. 44; Anexo 15), dándose por la expansión de los asentamientos humanos hacia la periferia (Fig. 47).

En Puebla, Chignahuapan presenta el menor incremento del intervalo estudiado (Anexo 17; Fig. 47)

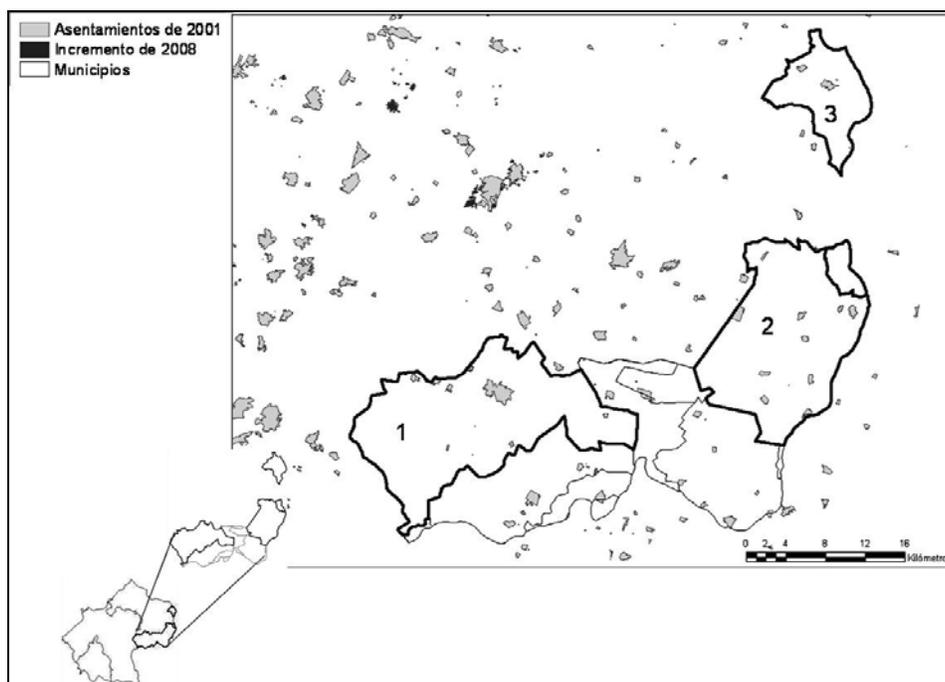


Fig. 47. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos de 2001 a 2008. 1. Calpulalpan, 2. Tlaxco, 3. Chignahuapan.

8.1.5.2 Crecimiento modelado con SLEUTH

Puebla y Tlaxcala de 2008 a 2020 de acuerdo con el E1, presentaron los crecimientos más bajos de todos los estados de la cuenca (1.43 km² y 18.4 km²; Tabla 14 y 15). Los municipios que tuvieron mayor incremento fueron Chignahuapan para el primero y Calpulalpan y Tlaxco para el segundo (Fig. 48), éste se dio por la expansión de la periferia (Fig. 49).

Tabla 14. Superficie de los asentamientos humanos en Tlaxcala del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.

Tlaxcala					
Año	Superficie de la entidad km ²	E1		E2	
		km ²	%	km ²	%
2020	789.58	18.4	2.3	17.95	2.3
2035	789.58	41.09	5.2	38.37	4.9

E1: escenario 1; E2: escenario 2

Tabla 15. Superficie de los asentamientos humanos en Puebla del E1 y E2 modelados con SLEUTH del 2020 al 2035.

Puebla					
Año	Superficie total km ²	E1		E2	
		km ²	%	km ²	%
2020	85.13	1.43	1.68	1.34	1.58
2035	85.13	3.20	3.76	2.99	3.51

E1: escenario 1; E2: escenario 2

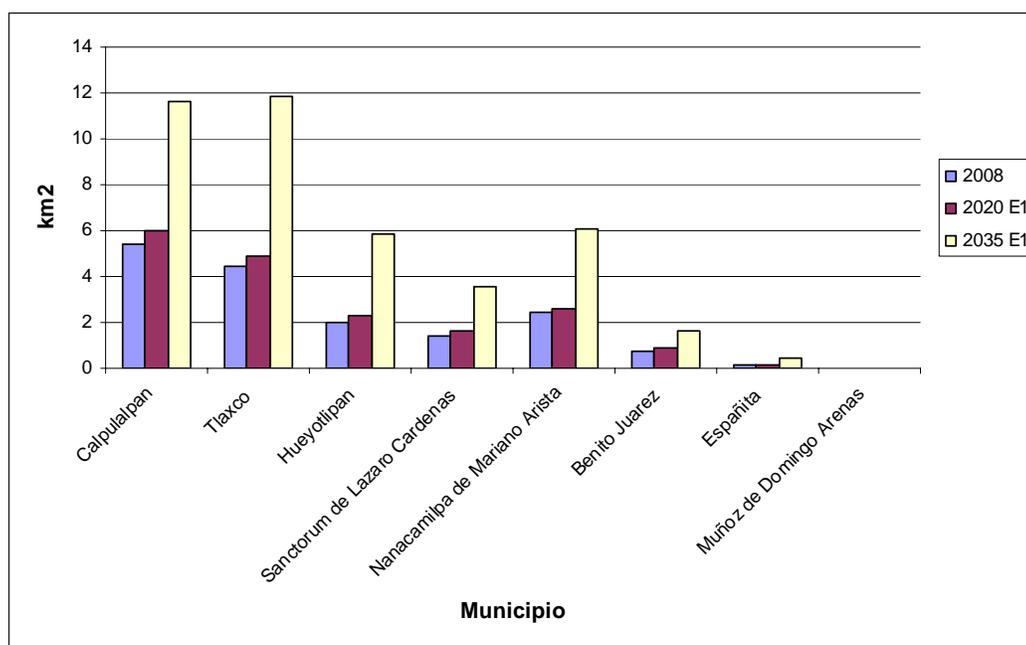


Fig. 48. Área de los asentamientos humanos del E1 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Tlaxcala. E1: escenario 1. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

En el segundo escenario los asentamientos humanos abarcaron 1.34 km² en Puebla y 17.95 km² en Tlaxcala (Tabla 15 y 16) y al igual que en el primer escenario, los municipios de este último que tuvieron mayor crecimiento fueron Calpulalpan y Tlaxco (Fig. 50), dándose por la expansión de los asentamientos humanos hacia la periferia (Fig. 51).

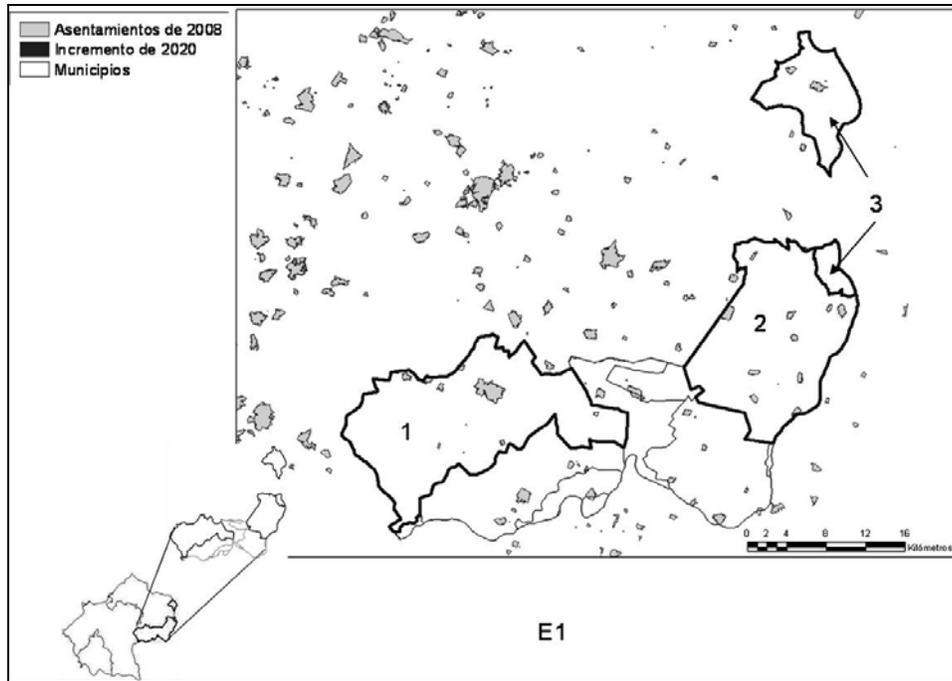


Fig. 49. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E1 modelado con SLEUTH. 1. E1: escenario 1. Calpulalpan, 2. Tlaxco, 3. Chignahuapan.

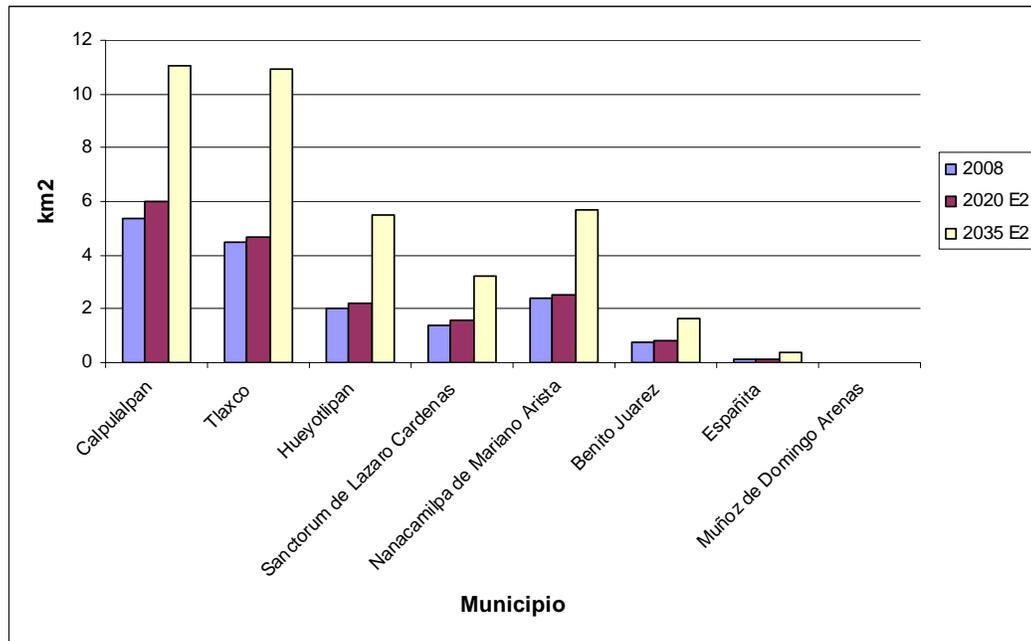


Fig. 50. Área de los asentamientos humanos del E2 modelado con SLEUTH de 2008 a 2035 en los municipios de Tlaxcala. E2: escenario 2. Los municipios se muestran en orden descendente de acuerdo al incremento observado de 2008-2020.

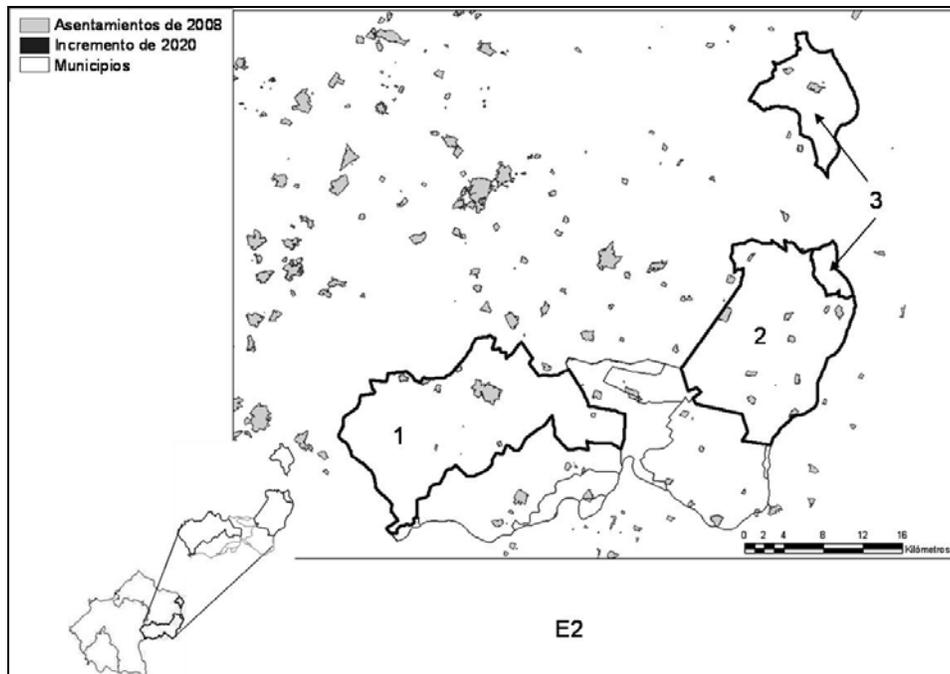


Fig. 51. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento en los asentamientos humanos, predicho de 2008 a 2020 en el E2 modelado con SLEUTH. E2: escenario 2. 1. Calpulalpan, 2. Tlaxco, 3. Chignahuapan.

De 2020 a 2035 Tlaxcala presentó un crecimiento diez veces superior (22.69 km^2 en el E1 y 20.42 km^2 en el E2) que de 2008 a 2020 (menor a 3 km^2 en ambos escenarios; Tabla 15).

Los municipios con mayor crecimiento en los dos escenarios fueron Tlaxco, Calpulalpan, Hueyotlipan y Nanacamilpa de Mariano Arista (Fig. 52 y 53).

Puebla siguió presentando el mismo patrón de crecimiento teniendo un incremento de 1.77 km^2 ó 1.65 km^2 (E1 y E2, respectivamente) que se dio en el municipio de Chignahuapan (Anexo 17 y 18).

Tanto en Puebla como en Tlaxcala, el crecimiento fue por la expansión de los asentamientos humanos hacia la periferia (Fig. 52 y 53).

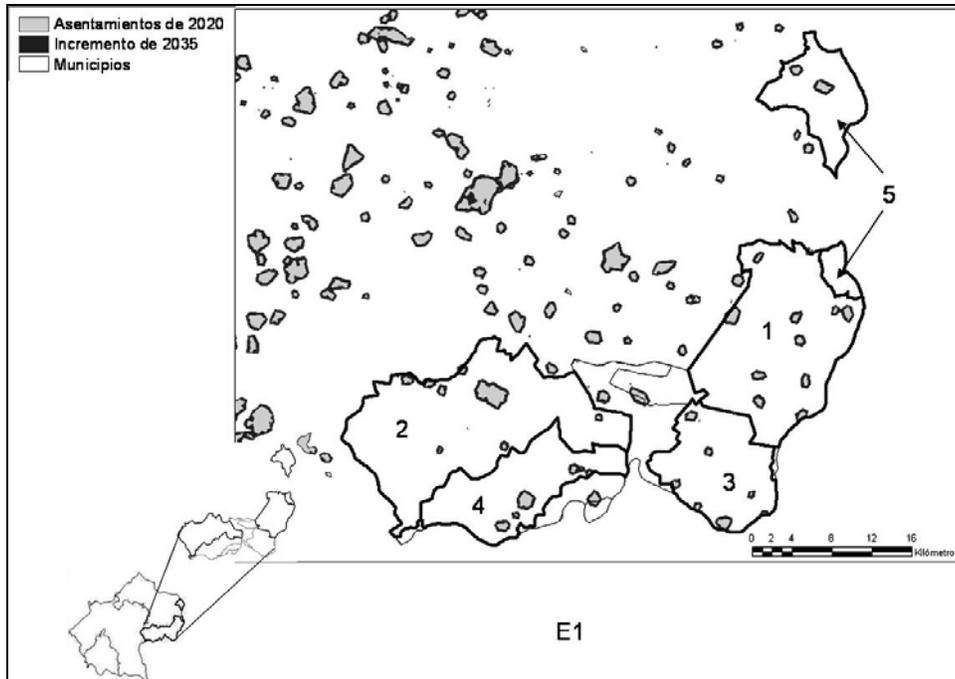


Fig. 52. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento de los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. E1: escenario 1. 1. Tlaxco, 2. Calpulalpan, 3. Hueyotlipan, 4. Nanacamilpa de Mariano Arista, 5. Chignahuapan.

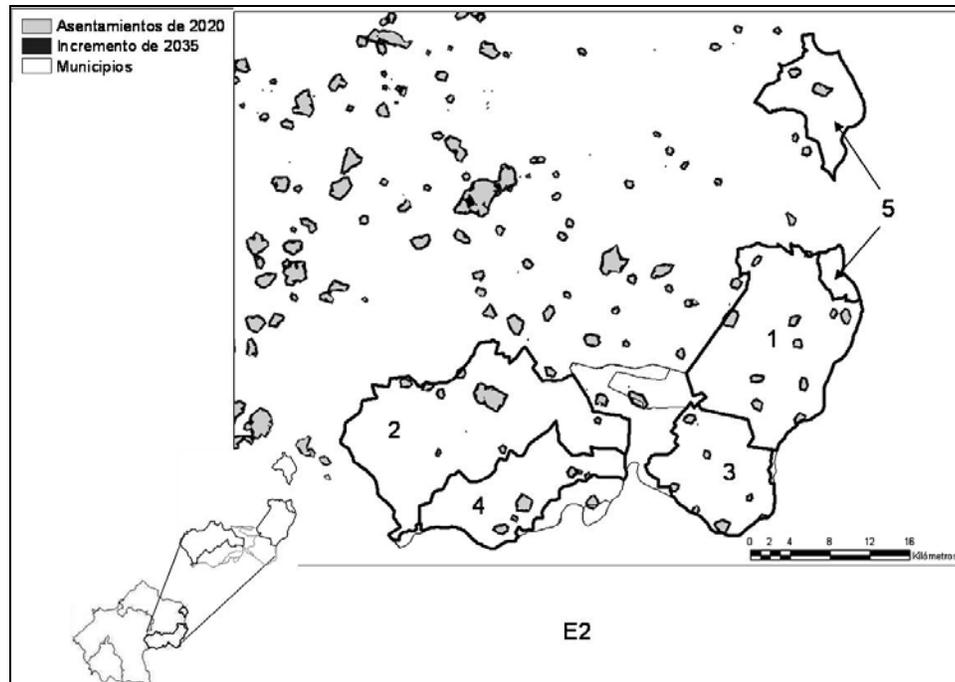


Fig. 53. Municipios de Tlaxcala y Puebla con mayor incremento de los asentamientos humanos, predicho de 2020 a 2035 en el E1 modelado con SLEUTH. 1. E2: escenario 2. Tlaxco, 2. Calpulalpan, 3. Hueyotlipan, 4. Nanacamilpa de Mariano Arista, 5. Chignahuapan.

8.2 Pérdida de UGA´s por el crecimiento de los asentamientos humanos en la Cuenca de México.

8.2.1 Pérdida al 2008

Desde la creación de los Ordenamientos Ecológicos Territoriales en los estados que conforman la cuenca, se ha perdido el 6.7% de la superficie destinada a la conservación y el 5.2% de protección, siendo mayor la invasión por los asentamientos en el Estado de México y Distrito Federal (Tabla 16).

En el Estado de México se ha perdido el 17.5% de áreas de conservación y 5.3% de protección, en el Distrito Federal el 4.8% y 4.6%. Hidalgo es el que presenta menores porcentajes (1.21% y 3.42%; Tabla 16).

Tabla 16. Pérdida de superficie al 2008 de las Unidades de Gestión Ambiental (UGA´s), establecidas en los OET´s de los estados de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos.

Entidad federativa	UGA 1		UGA 2		UGA 3		UGA 4	
	km ²	% ¹						
Distrito federal	54.60	40.5	22.68	4.8	2.80	4.6	0.53	5.9
Estado de México	917.54	26.1	68.97	17.5	48.63	5.3	4.48	32.6
Hidalgo	134.45	7.2	7.43	1.2	1.30	3.4	0.37	4.7
Tlaxcala	15.95	2.4	0	0	0	0	0.66	0.5
Total	1122.54	18.1	99.08	6.7	52.73	5.2	6.04	4

UGA 1 Unidad de gestión ambiental dedicada al aprovechamiento; UGA 2 dedicada a la conservación; UGA 3 dedicada a la protección; UGA 4 dedicada a la restauración.

¹Porcentaje con respecto al área total que ocupa cada UGA en la cuenca.

8.2.2 Pérdida por el crecimiento modelado con SLEUTH

De acuerdo a lo modelado en el E1 con SLEUTH, en el 2020 se perdió el 6.9% de áreas de conservación y el 5.3% de protección. En el E2 el porcentaje de las primeras es superior (7%) y en las segundas el mismo. Los estados que presentaron mayor decremento en la superficie de estas UGA´s fueron Estado de México y Distrito Federal (Tabla 17).

En las UGA´s de conservación, ambas entidades presentaron porcentajes de pérdida más altos en el E2 que en el E1 (el Distrito Federal 5.2% y 5.6% y el Estado de México 17.6% y 17.7%), como la diferencia es poca (0.4% en el DF y 0.1% en el Estado de México) se puede decir que la restricción al crecimiento no es un factor determinante que lo limite.

En las de protección no se observa el mismo patrón, ya que en el Distrito Federal es mayor en el E1 y en el Estado de México es igual en ambos escenarios, lo que indica que los OET´s no son un factor que impidan el incremento de la mancha (Tabla 17). También cabe destacar que

las áreas de conservación son más susceptibles a ser invadidas por los asentamientos humanos que las de protección.

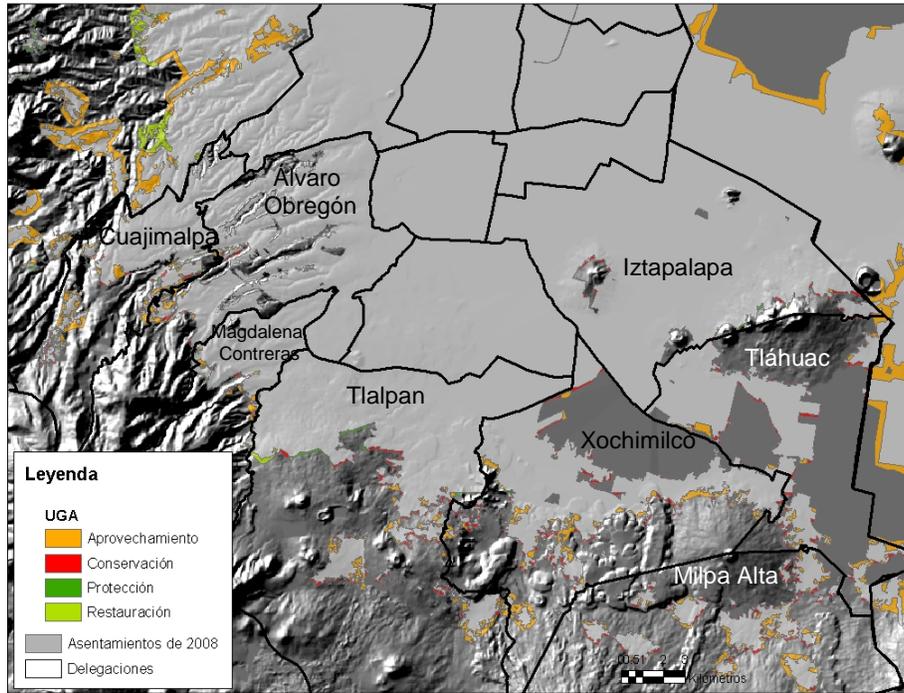
En Hidalgo se nota la misma dinámica que en el Estado de México y Distrito Federal, pero en menor proporción (Tabla 17).

En el 2035 la diferencia entre escenarios es mucho mayor que la registrada en el 2020 pues en el E1 se perdió el 7.7% de áreas de conservación y 5.8% de protección y en el E2 10.9% y 7.4%, lo que indica que las restricciones de los OET's sí juegan un papel importante en el establecimiento de los asentamientos para esta fecha.

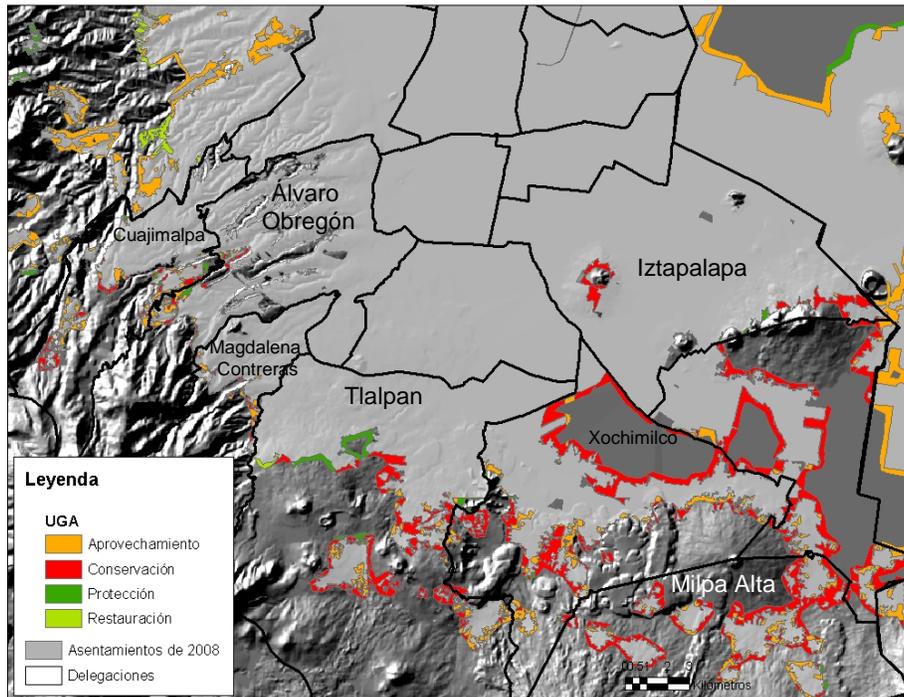
Tabla 17. Pérdida de superficie de las Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) establecidas en los OET's de los estados de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH (E1 y E2).

	Área total km ²	Superficie que se perderá							
		2020				2035			
		E1		E2		E1		E2	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
UGA 1									
Distrito federal	134.66	58.56	43.5	57.26	42.5	71.00	52.7	70.93	52.7
Estado de México	3521.66	1002.43	28.5	984.47	28.0	1412.74	40.1	1373.99	39.0
Hidalgo	1875.37	153.75	8.2	149.83	8.0	279.93	14.9	268.64	14.3
Tlaxcala	666.81	17.65	2.6	17.23	2.6	39.30	5.9	36.90	5.5
Total	6198.49	1232.39	19.9	1208.80	19.5	1802.97	29.1	1750.46	28.2
UGA 2									
Distrito federal	475.34	24.81	5.2	26.65	5.6	33.24	7.0	69.30	14.6
Estado de México	394.78	69.47	17.6	69.69	17.7	71.19	18.0	76.74	19.4
Hidalgo	614.46	7.56	1.2	7.71	1.3	9.23	1.5	15.13	2.5
Tlaxcala	0.20	0.01	3.8	0.01	3.9	0.01	4.2	0.01	4.2
Total	1484.77	101.84	6.9	104.06	7.0	113.67	7.7	161.19	10.9
UGA 3									
Distrito federal	60.72	2.94	4.8	2.88	4.7	3.78	6.2	5.72	9.4
Estado de México	911.63	49.07	5.4	49.45	5.4	53.78	5.9	68.04	7.5
Hidalgo	37.88	1.29	3.4	1.28	3.4	1.35	3.6	1.46	3.9
Tlaxcala	0.08	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Total	1010.30	53.29	5.3	53.61	5.3	58.91	5.8	75.22	7.4
UGA 4									
Distrito federal	9.06	0.55	6.1	0.53	5.8	0.86	9.4	0.80	8.8
Estado de México	13.76	4.67	34.0	4.60	33.4	7.14	51.9	6.29	45.7
Hidalgo	7.98	0.48	6.0	0.40	5.0	1.67	21.0	1.56	19.6
Tlaxcala	121.48	0.71	0.6	0.69	0.6	1.80	1.5	1.46	1.2
Total	152.28	6.42	4.2	6.22	4.08	11.47	7.5	10.11	6.6

UGA 1 Unidad de gestión ambiental dedicada al aprovechamiento; UGA 2 dedicada a la conservación; UGA 3 dedicada a la protección; UGA 4 dedicada a la restauración; E1, escenario 1; E2, escenario 2.

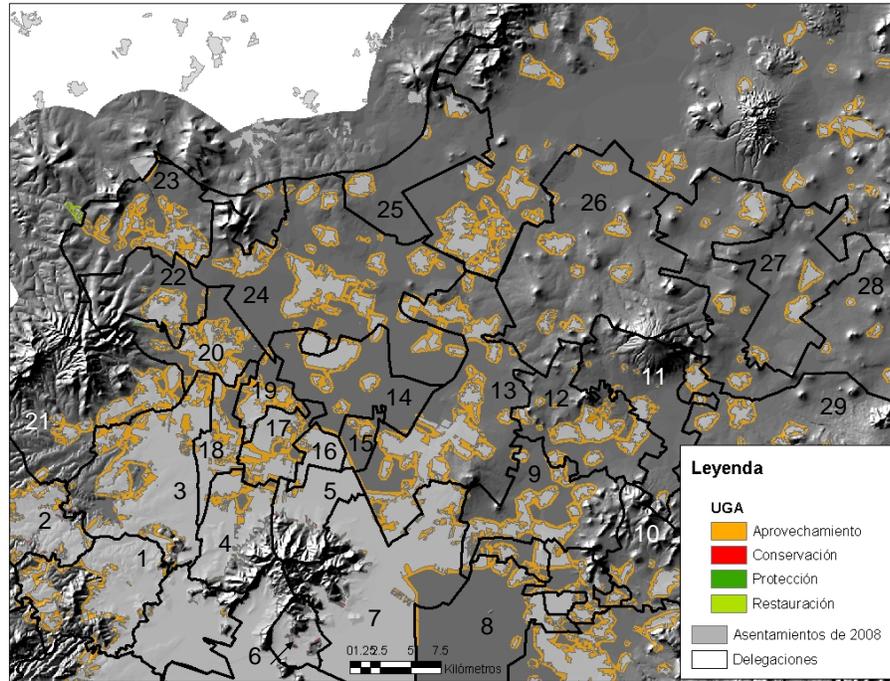


E1

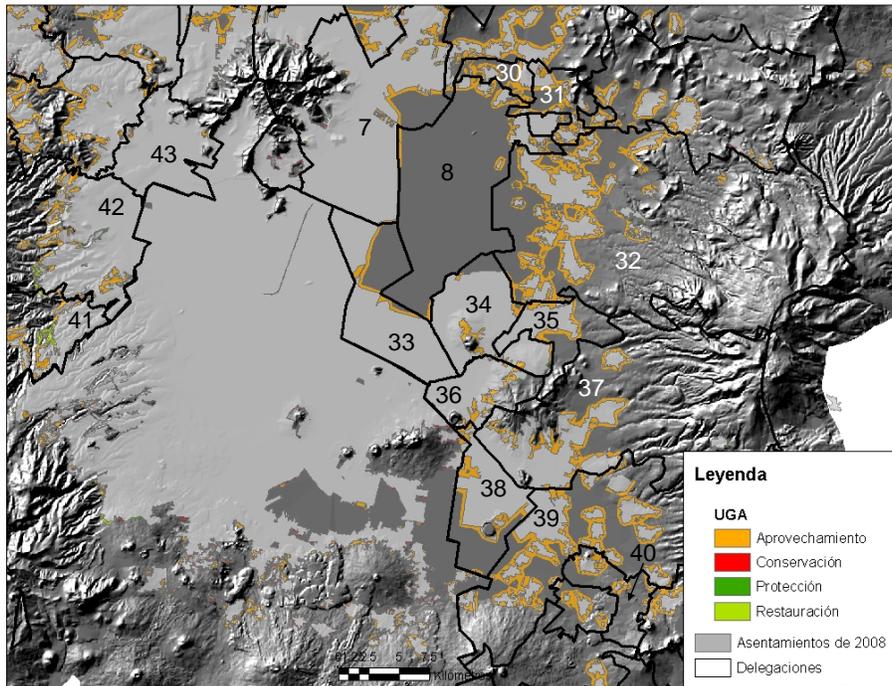


E2

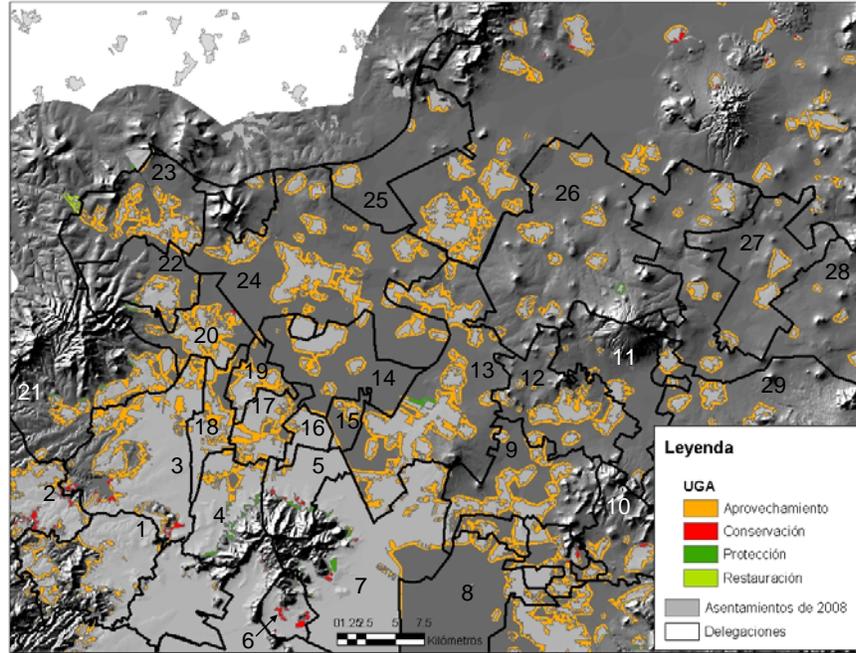
Fig. 54. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 de los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en el Distrito Federal. E1: escenario 1; E2: escenario 2.



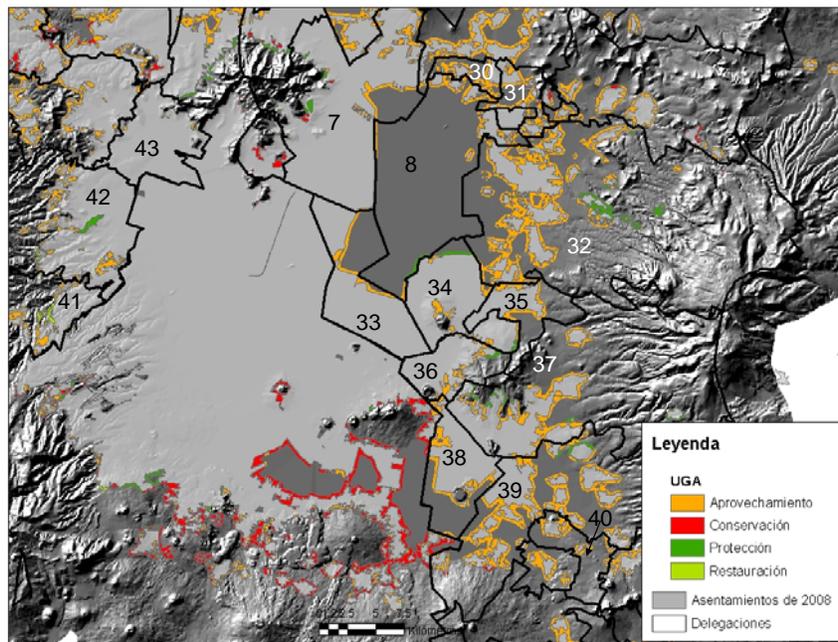
**Norte del Estado
E1**



**Sur del Estado
E1**

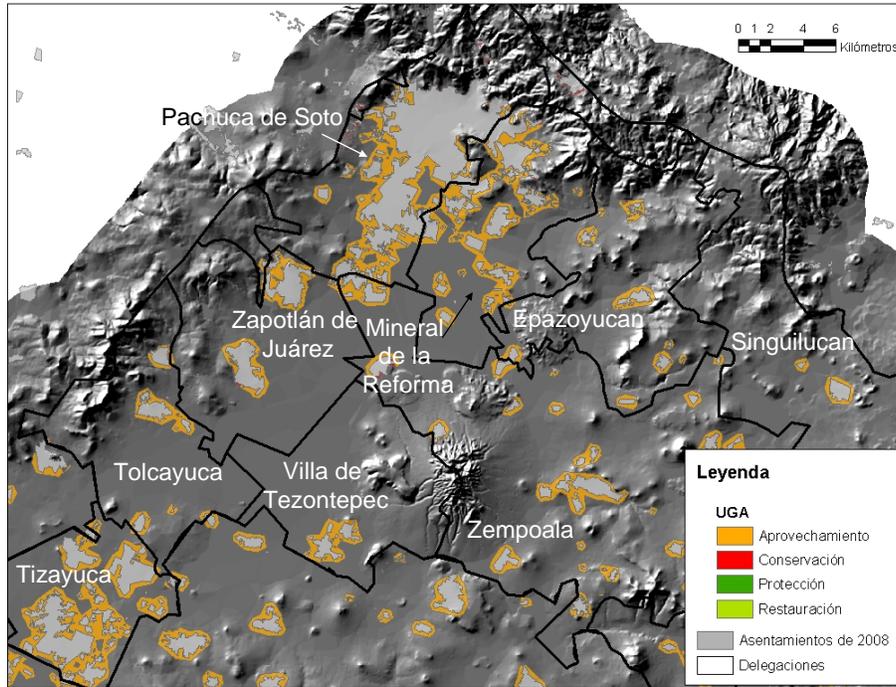


Norte del Estado. E2

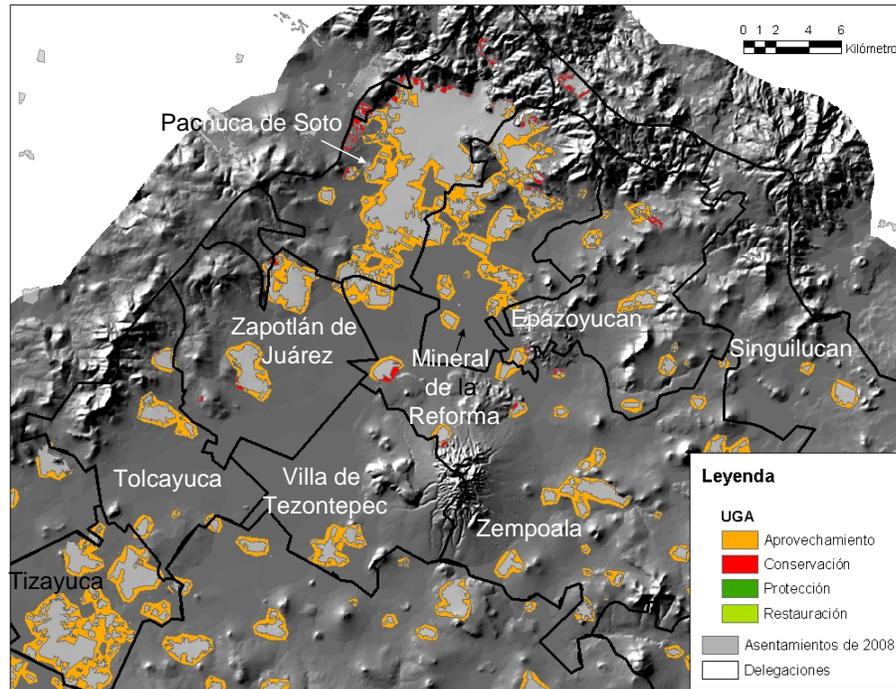


Sur del Estado. E2

Fig. 55. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 de los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en el Estado de México. Norte y sur del estado. E1: escenario 1; E2: escenario 2. 1. Atizapán de Zaragoza, 2. Nicolás Romero, 3. Cuautitlán Izcalli, 4. Tultitlán, 5. Coacalco de Berriozabal, 6. Tlalnepantla de Baz, 7. Ecatepec de Morelos, 8. Atenco, 9. Acolman, 10. Tepetlaoxtoc, 11. San Martín de las Pirámides, 12. Teotihuacan, 13. Tecamac, 14. Nextlalpan, 15. Jaltenco, 16. Tultitlán, 17. Tultepec, 18. Cuautitlán, 19. Melchor Ocampo, 20. Teoloyucan, 21. Tepotzotlán, 22. Coyotepec, 23. Huehuetoca, 24. Zumpango, 25. Hueyoxotla, 26. Temascalpa, 27. Nopaltepec, 28. Axapusco, 29. Otumba, 30. Tezoyuca, 31. Chiautla, 32. Texcoco, 33. Nezahualcóyotl, 34. Chimalhuacán, 35. Chicoloapan, 36. La Paz, 37. Ixtapaluca, 38. Valle de Chalco Solidaridad, 39. Chalco, 40. Cocotitlán, 41. Huixquilucan, 42. Naucalpan de Juárez, 43. Tlalnepantla de Baz.



E1



E2

Fig. 56. Pérdida de Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) por el crecimiento de los asentamientos humanos al 2035 en los E1 y E2 proyectados con SLEUTH en Hidalgo. E1: escenario 1; E2: escenario 2.

En este periodo (2020-2035) el Distrito Federal es el que llama más la atención, pues las áreas destinadas a la conservación presentan una pérdida en el E2 de más del doble del E1 (el E2 tuvo 14.6% y el E1 7%). En las de protección el decremento en el E2 también es mayor pero con una diferencia de 3.2% (Tabla 17), lo que indica que la restricción que les confiere el OET a las áreas de conservación y protección sí juega un papel importante, ya que de no existir, éstas serían invadidas por los asentamientos humanos (Fig. 54), por lo tanto su preservación debe ser prioritaria al momento de la toma de decisiones para evitar el avance de estos.

En el Estado de México el crecimiento modelado invadió el 18% en el E1 y el 19.4% en el E2 de las áreas de conservación y el 5.9% y 7.5% de protección (Tabla 17). Como en las dos UGA´s la pérdida es superior en el E2, se puede decir que las restricciones impuestas en el OET sí impiden el crecimiento de los asentamientos y por lo tanto deben de mantenerse y mejorarse, pues hay UGA´s que son propensas a la invasión como lo muestra el E2 (Fig. 55)

De 2020 a 2035, las zonas destinadas a la conservación en Hidalgo tuvieron un decremento en el E2 de 2.5%, casi el doble del 2020 (1.3%), el que en el E1 no se observe la misma dinámica (Tabla 17), nos indica que las restricciones del OET sí impiden el crecimiento de los asentamientos humanos, por lo tanto la protección de estas áreas (Fig. 56) debe ser prioridad al tomar decisiones de ordenamiento territorial.

También cabe destacar que en este estado las áreas de conservación son más susceptibles a la invasión que las de protección (Tabla 17).

8.3 Pérdida de Áreas Naturales Protegidas por el crecimiento de los asentamientos humanos

Todas las ANP's⁵ que se encuentran en la Cuenca de México son Parques Nacionales⁶ y de éstas, las que han perdido el 100% de su superficie al año 2008 son, Fuentes Brotantes de Tlalpan e Histórico de Coyoacán, otras que se han visto afectadas por el incremento de los asentamientos humanos a esta fecha son Cerro de la Estrella, Los Remedios, Lomas de Padierna, El Tepeyac y Sacromonte (Tabla 18).

Lo anterior concuerda con lo encontrado por Velásquez (2001), quien señala que se ha perdido aproximadamente el 50% de la superficie originalmente decretada como Parque Nacional del D.F., debido al establecimiento de asentamientos humanos irregulares y al avance desordenado de la mancha urbana, sobresaliendo Fuentes Brotantes de Tlalpan, El Tepeyac, El Cerro de la Estrella, Lomas de Padierna e Histórico de Coyoacán.

8.3.1 Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan

De las ANP's que se encuentran dentro de la cuenca, la que más destaca es Fuentes Brotantes de Tlalpan que para 1985 ya había perdido el 100% de su superficie (Tabla 18).

Este Parque Nacional es decretado en 1936 por su belleza escénica y porque en él emergen a la superficie aguas de los manantiales al fondo de la barranca cubierta de arbolado.

Dentro de los objetivos de este parque estaban el crear una policía forestal conformada por Guardas Forestales que reforestarían el área, constituyendo una demostración de la necesidad de contar con un cuerpo de policía que garantizara la conservación de los bosques y la creación de un vivero piscícola para la procreación de especies finas de pescado (DOF, 1936).

De acuerdo a lo obtenido en este estudio dichos objetivos no fueron cumplidos, ya que se ha perdido el 100% del Parque, lo que se traduce en pérdidas de bosques, agua y áreas para la recreación (Fig. 57). Esto concuerda con lo expuesto por Vargas (1997) quien afirma que este Parque ha sido invadido por asentamientos irregulares y que desde su creación no cumplía con los requerimientos para ser considerado Parque Nacional, por lo que debería ser derogado y convertido en Parque Urbano a cargo del Departamento del Distrito Federal, ya que éste evita la erosión, proporciona oxígeno y estabiliza el clima.

⁵ Las Áreas Naturales Protegidas (ANP's) son porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos. Se crean mediante un decreto presidencial y las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (CONANP, 2007).

⁶ **Parques Nacionales.** Áreas con uno o más ecosistemas que sean importantes por su belleza escénica, por la existencia de flora y fauna, por su valor científico y/o histórico, educativo de recreo, por su aptitud para el desarrollo del turismo ó por otras razones análogas de interés general (CONANP, 2007).

8.3.2 Parque Nacional Histórico de Coyoacán

Otra ANP que llama la atención es Histórico de Coyoacán que en 1995 perdió el 100% de su superficie (Tabla 18, Fig. 57). De acuerdo con Vargas (1997) este Parque se encuentra urbanizado casi en su totalidad, protegiéndose solamente el área de los Viveros de Coyoacán, pero como INEGI en este año los contempla dentro del área urbana, en este estudio Histórico de Coyoacán ha sido cubierto por completo por los asentamientos humanos.

8.3.3 Parque Nacional Cerro de la Estrella

En 1938 se creó con la finalidad de conservar y mejorar los lugares que, por su belleza, son importantes para el recreo y fomento del turismo, además de ser un volcán de interés geológico e histórico, pues alberga vestigios de tradiciones y ceremonias de la cultura Azteca (Vargas, 1997).

De la superficie establecida en el decreto, en 1985 ya habían sido invadidas 729.55 ha (61.7%) y para 1995 el 83.8% (Tabla 18), por lo que los objetivos planteados en éste no se cumplieron.

La poca efectividad del decreto se confirma cuando en 1991 se expropiaron 143.145 ha de este Parque, denominándolas como Zona Sujeta a Conservación Ecológica (Vargas, 1997) y de acuerdo a lo obtenido en este estudio, dicho cambio favoreció la conservación del Cerro de la Estrella ya que de 1995 a 2008 sólo se perdió 0.4% de la superficie, cifra mucho menor que de 1985 a 1995 (Tabla 18).

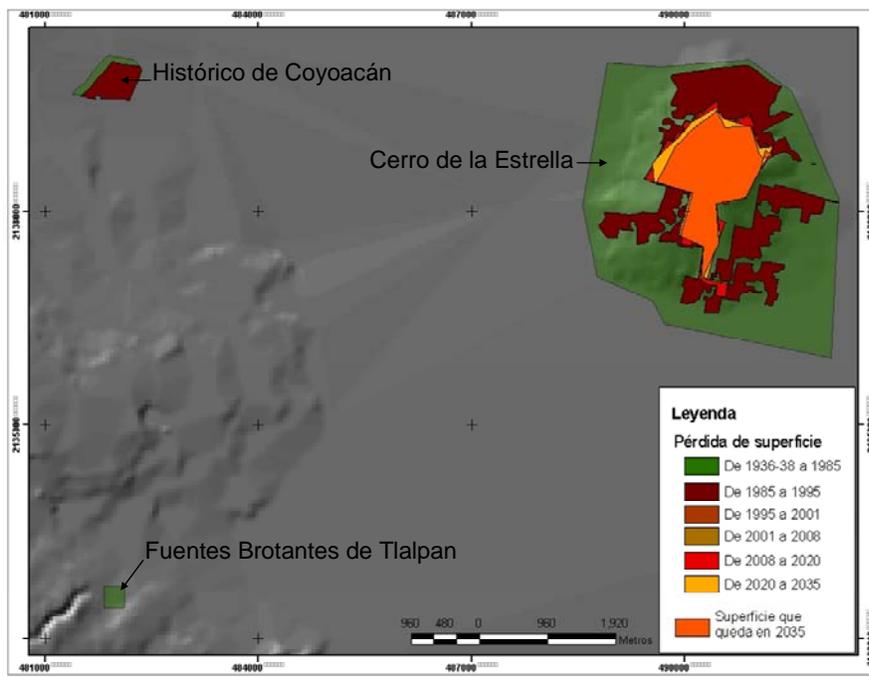
De acuerdo con esta declaratoria, es importante conservar el área denominada Cerro de la Estrella porque constituye una reserva biótica del Valle de México y presenta suelos tipo feozem, los cuales permiten la recarga de acuíferos. De no protegerse, será invadida, generando nuevas fuentes de contaminación y provocando la pérdida de las características antes mencionadas (Vargas, 1997).

Observando la pérdida por el incremento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH (Fig. 57), los lineamientos establecidos por dicha declaratoria, sí impiden el avance de éstos ya que en el 2035 del E1 invadieron el 86.9% de la superficie total, 6.9% menos que en el E2 (Tabla 19).

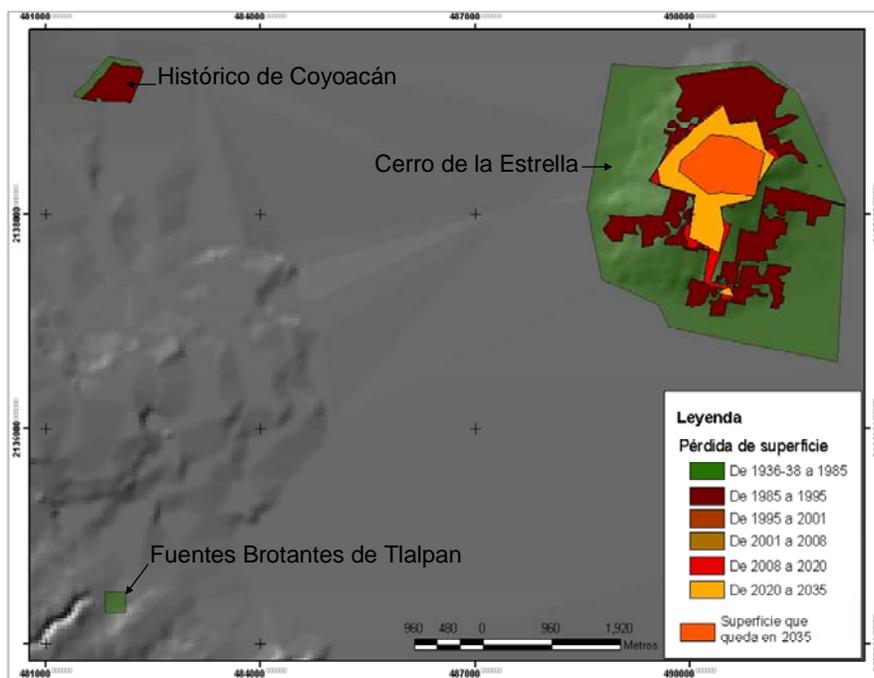
Aunque el E1 presenta un menor incremento que el E2, es importante mencionar que el avance de los asentamientos humanos no se detiene, lo cual significa que todavía hay áreas que pueden ser invadidas (32.29 ha), por lo que se debe poner especial atención en esta superficie para su conservación (Fig. 57).

Proteger lo que queda del Cerro de la Estrella es importante ya que, aunado a lo antes mencionado, está lo expuesto en la Gaceta Oficial del Distrito Federal en el 2005, donde se declara como ANP bajo la categoría de Zona Ecológica y Cultural al “Cerro de la Estrella”. En ésta se establece que la zona es primordial para la ciudad al proporcionar diversos servicios ambientales de gran relevancia (regulación de clima, captación e infiltración de agua al manto acuífero, recreación, investigación, educación y mejoramiento de la calidad del aire) también

cuenta con matorrales xerófilos y pastizales originarios de la zona, siendo el hábitat de alrededor de 241 especies de flora y fauna silvestres (172 y 69 respectivamente) y 2 endémicas de México (GODF, 2005).



E1



E2

Fig. 57. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de 1985 a 2035 en las ANP's Histórico de Coyoacán, Cerro de la Estrella y Fuentes Brotantes. E1: escenario 1; E2: escenario 2.

8.3.4 Parque Nacional Los Remedios

En 1938, Los Remedios se decretó como Parque Nacional con la finalidad de realizar trabajos de reforestación y conservación, tanto para restituir la vegetación perdida, como para restaurar el antiguo paisaje forestal de la comarca y así proteger de los agentes físicos de desintegración a los lomeríos del contorno (Vargas, 1997).

En 1986 la federación, el gobierno del Estado de México y el municipio de Naucalpan firmaron un convenio de colaboración administrativa para la conservación, protección, vigilancia, promoción y desarrollo del Parque Nacional Los Remedios. Con esto el gobierno del estado y el municipio están comprometidos a observar las normas técnicas que dicte SEDUE. Dicho convenio se ha renovado y sigue vigente (*op. cit.*).

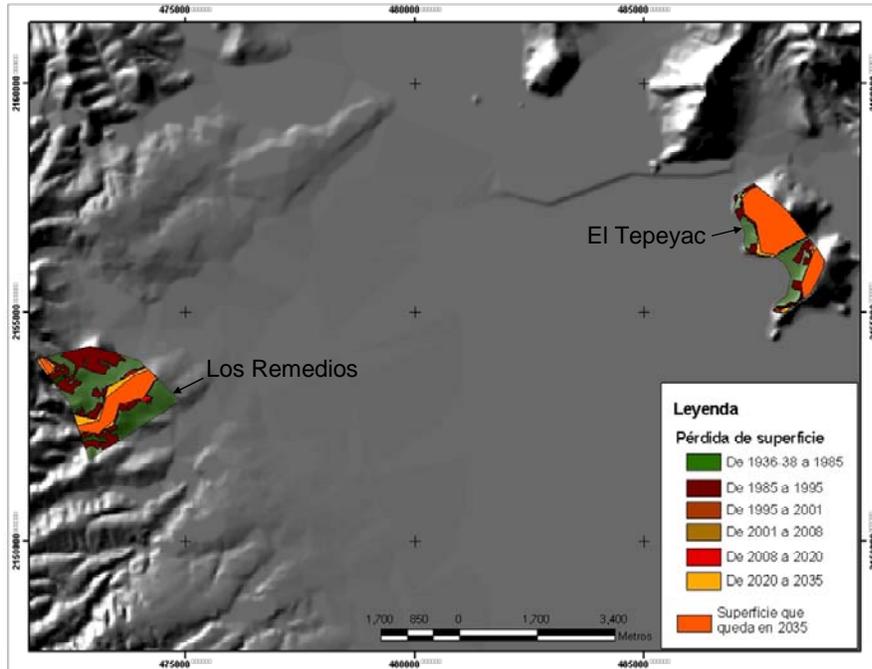
Las pérdidas de este Parque del 47.7% en 1985 y del 75.8% en 2008, (Tabla 18), indican que las políticas empleadas para su conservación han sido ineficientes, ya que su superficie sigue en decremento (Fig. 58). Esto concuerda con Vargas (1997) quien expone que el parque cuenta con una superficie de 110 ha (la superficie original era de alrededor de 400 ha) como resultado del proceso de urbanización e invasión de tierras.

Otros problemas que enfrenta éste son el alto índice de contaminación atmosférica, erosión del suelo, extracción de materiales, acumulación de desechos sólidos, inseguridad, litigios, incendios, tala, pastoreo con ganado ovino y vacuno en áreas forestales, presencia de plagas e incendios forestales, sirve como banco de materiales, no conserva ningún ecosistema natural y existe comercio incontrolado durante semana santa y fines de semana (Vargas, 1997).

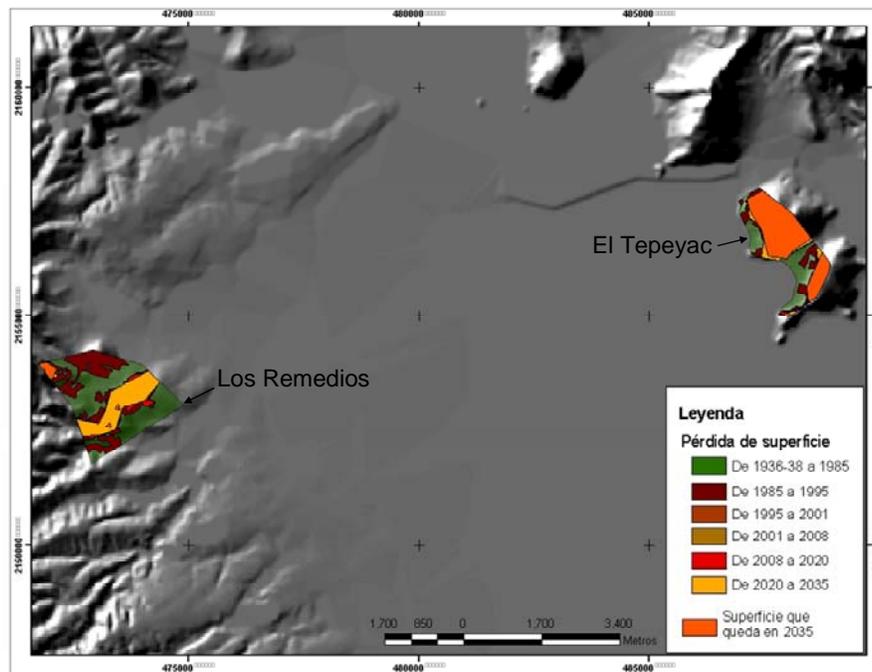
Todo esto ha provocado que los recursos naturales presenten algún grado de deterioro, como es el caso de la vegetación, caracterizándose por la predominancia de Eucalipto (especie introducida) que inhibe el crecimiento de otras especies arbóreas y arbustivas, provocando la pérdida de biodiversidad y de belleza escénica (*op. cit.*).

De acuerdo a lo proyectado al 2020, en el E1 el parque perdió el 76.1%, 0.7% menos que en el E2 (76.8%). En 2035 se observa la misma dinámica, siendo superior la pérdida en el E2 (98.1%) que en el E1 (83.4%; Tabla 19), esto indica que la restricción de ANP sí juega un papel importante en la conservación de Los Remedios, ya que de no existir, éste sería invadido por los asentamientos humanos, pues cuenta con las condiciones para que suceda, por lo tanto se debe de poner mayor atención a estas áreas ya que es muy probable que sean pobladas (Fig. 58).

Es importante conservar este Parque porque es la única área verde en el municipio de Naucalpan (Vargas, 1997) y de acuerdo a lo encontrado en este estudio, de no crearse un instrumento que regule el crecimiento de los asentamientos humanos, Los Remedios se perderán casi por completo por lo que, debe revisarse su situación y modificar el decreto y convenios firmados ya que no han dado resultados favorables.



E1



E2

Fig. 58. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de 1985 a 2035 en las ANP's Los Remedios y El Tepeyac.

8.3.5 Parque Nacional Lomas de Padierna

Este parque forma parte del Sistema Neovolcánico Transversal, comprendiendo el pie de monte de la Sierra de las Cruces, presentando uno de los sistemas fluviales más activos de la Cuenca de México. Cuenta con 53.5 ha de ecosistemas semiperturbados, 46.5 ha de matorral inerme y 7 ha de bosque de encino y otras especies como resultado de recientes reforestaciones (Vargas, 1997).

Fue decretado debido a su valor histórico, al ser el campo donde se desarrolló la batalla de 20 de agosto de 1847 durante la guerra de intervención norteamericana y también, para constituir un poderoso atractivo para el turismo, benéfico para los pueblos de San Jerónimo, Contreras, La Magdalena, Santa Teresa y demás poblados de la región (*op. cit.*).

Lo anterior no se ha conseguido pues, de acuerdo a lo encontrado en este estudio, en 1985 ya había sido invadido el 16% de su superficie y para el 2008 el 58.5% (Tabla 18).

Esto concuerda con Fernández *et al.* (2007) quienes establecen que Lomas de Padierna enfrenta un sostenido proceso de degradación de sus recursos naturales y el área contigua a la zona urbana se encuentra seriamente amenazada, perdiendo los ecosistemas que facilitan la recarga debido a los asentamientos irregulares.

Vargas (1997) comenta que a partir de 1940-1945, se comenzó la explotación intensiva de los bosques comunales y ejidales del Cerro del Judío, dejando las laderas desnudas que, al no ser buenas para el cultivo, se comenzó la construcción de viviendas en ellas. Otro factor que desencadenó la invasión de este Parque fue la apertura de la carretera de San Bernabé.

También menciona que la superficie del parque se ha reducido considerablemente por el crecimiento de la mancha urbana, quedando solamente el Cerro del Judío con 53.5 ha de ecosistemas semiperturbados. Sumado a esto están las invasiones, litigios, asentamientos humanos irregulares, incendios, plagas y no cuenta con una administración.

En cuanto a lo proyectado, los asentamientos humanos no avanzaron hacia esta zona (Tabla 19), lo que indica que la normatividad no es el factor determinante en el incremento de estos, sino la accesibilidad, ya que es una zona con relieve altamente accidentado y con pocos caminos.

8.3.6 Parque Nacional El Tepeyac

El Parque Nacional El Tepeyac para 1985 perdió el 27.1% de su territorio, en 1995 el 39.5% y en el 2008 el 40.8% (Tabla 18).

Este Parque fue decretado en 1937 con la finalidad de conservar un valioso exponente de los trabajos de reforestación llevados a cabo, los cuales constituirían una enseñanza a los habitantes de la capital de la República y al turismo en general. Actualmente presenta invasiones, vandalismo, litigios, incendios forestales y acumulación de desechos tanto por el

desazolve de los ríos Remedios y Tlalnepantla y de la Laguna de Carretas, como por las colonias que se han asentado en éste (Vargas, 1997).

De acuerdo con lo obtenido en los E1 y E2 al 2020, no hubo incremento de los asentamientos en esta área, pero para el 2035, en el E2 el parque perdió el 45% de su superficie (Fig. 58). Como el E1 mostró un decremento menor en la extensión de éste (43.2%, Tabla 19), se espera que de no establecerse limitaciones al crecimiento a través de la regulación de su manejo, los asentamientos humanos seguirán avanzando en El Tepeyac, ya que lo único que detuvo el desarrollo de estos en lo proyectado es la restricción impuesta en el E2.

Por lo tanto es importante poner atención en resguardar la superficie que queda de este parque, (Fig. 58) modificando su reglamentación a las necesidades actuales de El Tepeyac, lo que concuerda con Vargas (1997) quien establece que desde su creación no cumplía con los requerimientos para considerarlo Parque Nacional, por lo que debería ser derogado y convertido a Parque Urbano o Zona de Conservación Ecológica a cargo del Departamento del Distrito Federal, pues al estar cerca de la Ciudad de México es importante mantenerlo, ya que evita la erosión, proporciona oxígeno, estabiliza el clima y permite la conservación de las especies botánicas introducidas por la reforestación.

8.3.7 Parque Nacional Sacromonte

Dentro de los parques que han sido afectados por el avance de los asentamientos humanos, Sacromonte es el que ha tenido menor pérdida en superficie, pues en 1985 estos cubrieron el 8.5% de su territorio y en 2008 el 21.5% (Tabla 18). Enfrenta invasiones, incendios y plagas forestales.

Aunque al 2008 los asentamientos no invaden el Parque en las proporciones que los otros, se espera que de cumplirse lo modelado al 2035 en el E1 y E2 con SLEUTH, éste perderá el 48.2% de su superficie (Tabla 19).

El que en ambos escenarios la pérdida sea la misma, indica que el crecimiento sólo puede darse hacia el ANP Sacromonte, por lo que se debe poner atención en este Parque, pues las políticas ambientales establecidas no serán un factor determinante en impedir el establecimiento de los asentamientos humanos.

Este parque es importante al ser un lugar de gran belleza natural, conservando un monumento colonial que está íntimamente ligado a las tradiciones de los pueblos de la región de Amecameca, Sacromonte y Tlalmanalco. Por lo que para su protección de acuerdo con Vargas (1997), el decreto debería de derogarse y trasformarlo en parque urbano, municipal-religioso o monumento histórico. Esto concuerda con lo encontrado en el presente trabajo.

8.3.8 Parque Nacional Molino de las Flores

Aunque este Parque no presenta invasión de su territorio por los asentamientos humanos de 1985 a 2008, para el 2035 estos lo alcanzarán, perdiéndose el 5% de su superficie si se siguen las políticas ambientales impuestas ó el 11.4% de no aplicarlas (Tabla 19).

La importancia de este parque radica en que resguarda capillas de tipo barroco decoradas por artistas célebres de la época y otras construcciones típicas, que encierran recuerdos históricos de la Independencia nacional, todos rodeados de gran belleza natural (Vargas 1997).

Presenta contaminación por descarga de aguas residuales, alta tasa de erosión hídrica, exceso de puestos de comida, no existe un control de los turistas provocando la contaminación por generación de desechos y de manera general, se encuentra muy deteriorado (*op. cit.*).

Por lo tanto, de acuerdo a lo obtenido en este estudio y a lo antes descrito, se debe de modificar las políticas de conservación que se han aplicado en este Parque. Esto concuerda con lo propuesto por Vargas (1997) quien sugiere derogarlo y nombrarlo parque urbano o monumento histórico.

Tabla 18. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos en el periodo 1985-2008 de las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la Cuenca de México.

ANP	Superficie total ha	Pérdida de superficie							
		1985		1995		2001		2008	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
El Chico	529.01	0	0	0	0	0	0	0	0
Molino de Flores Netzahualcoyotl	45.66	0	0	0	0	0	0	0	0
El Tepeyac	249.44	67.55	27.1	98.57	39.5	99.40	39.9	101.80	40.8
Los Remedios	400.15	190.90	47.7	298.16	74.5	299.82	74.9	303.37	75.8
Iztaccihuatl-Popocatepetl	11574.67	0	0	0	0	0	0	0	0
Histórico de Coyoacán	39.77	11.54	29	39.77	100	39.77	100	39.77	100
Cerro de la Estrella	1183.28	729.55	61.7	991.62	83.8	991.62	83.8	995.87	84.2
Desierto de los Leones	1523.88	0	0	0	0	0	0	0	0
Insur. Miguel Hidalgo y Costilla	344.91	0	0	0	0	0	0	0	0.1
Lomas de Padierna	8.65	1.39	16	4.77	55.1	4.77	55.1	5.07	58.5
Fuentes Brotantes de Tlalpan	8.65	8.65	100	8.65	100	8.65	100	8.65	100
Cumbres del Ajusco	311.46	0	0	0	0	0	0	0	0
Sacromonte	43.73	3.70	8.5	9.20	21	9.20	21	9.41	21.5

Tabla 19. Pérdida de superficie por el incremento de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH, en el periodo 2008-2035, de las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la Cuenca de México.

ANP	Superficie total ha	Pérdida de superficie									
		2008		E1				E2			
		ha	%	2020		2035		2020		2035	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
El Chico	529.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molino de Flores Netzahualcoyotl	45.66	0	0	0	0	2	5	0	0	5	11.4
El Tepeyac	249.44	101.80	40.8	101.80	40.8	107.76	43.2	101.80	40.8	112.26	45.0
Los Remedios	400.15	303.37	75.8	304.58	76.1	325.81	81.4	307.24	76.8	391.22	97.8
Iztaccihuatl-Popocatepetl	11574.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Histórico de Coyoacán	39.77	39.77	100	39.77	100	39.77	100	39.77	100	39.77	100
Cerro de la Estrella	1183.28	995.87	84.2	1008.65	85.2	1028.16	86.9	1013.73	85.7	1109.89	93.8
Desierto de los Leones	1523.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Insur. Miguel Hidalgo y Costilla	344.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lomas de Padierna	8.65	5.07	58.5	5.07	58.5	5.07	58.5	5.07	58.5	5.07	58.3
Fuentes Brotantes de Tlalpan	8.65	8.65	100	8.65	100	8.65	100	8.65	100	8.65	100
Cumbres del Ajusco	311.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sacromonte	43.73	9.41	21.5	10.78	24.6	21.06	48.2	10.61	24.3	21.07	48.2

8.4 Clasificación de las imágenes de satélite

De los 225 puntos usados para la verificación, 192 correspondieron a la categoría asignada (Tabla 20), lo que dio una confiabilidad a la clasificación de 85.33%, valor que se encuentra dentro del rango de exactitud real calculado para esta muestra. El índice Kappa que se obtuvo fue de 0.74 lo cual indica que la clasificación es un 74% mejor que la esperada por azar (Tabla 21).

Tabla 20. Matriz de confusión de la clasificación de la capa de vegetación y uso de suelo 2008.

Clases	1	3	4	5	6	7	8	9	Total	ExU %	EC %
1	55	0	0	5	0	2	1	0	63	87.30	12.70
3	0	13	0	2	0	0	0	0	15	86.67	13.33
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
5	0	11	1	83	5	1	0	0	101	82.18	17.82
6	0	1	1	0	34	0	0	0	36	94.44	5.56
7	0	0	0	2	0	4	0	0	6	66.67	33.33
8	1	0	0	0	0	0	3	0	4	75	25
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Total	56	25	2	92	39	7	4	0	192		
ExP %	98.21	52	0	90.22	87.18	57.14	100	0			
EO %	1.79	48	100	9.783	12.82	42.86	0	100			

1: Bosque; 3: Matorral; 4: Pastizal de alta montaña; 5: Agropecuario; 6: Asentamientos humanos; 7: Suelo desnudo; 8: Agua; 9: Nubes; Total: número total de puntos de verificación por columna y renglón; ExU: exactitud del usuario; EC: error de comisión; ExP: exactitud del productor; EO: error de omisión.

Tabla 21. Estadísticos obtenidos de la clasificación de la capa de vegetación y uso de suelo 2008.

Estadístico	Valor
Fiabilidad	85.33
Rango de exactitud	80.71-89.96
Índice kappa	0.74

Las clases con mayor precisión fueron Asentamientos humanos, Bosques y Agropecuario, mientras que Suelo desnudo y Agua tuvieron más incertidumbre, el primero al confundirse con agricultura y el segundo con bosques, ésta se puede deber al número de puntos asignados a cada clase (6 y 4, respectivamente). Pastizal de alta montaña y Nubes no fueron muestreados (Tabla 20).

La clase que cubre mayor porcentaje de la cuenca es Agropecuario (35.9%) y le sigue Asentamientos humanos (23.3%); la que ocupó menor porcentaje fue Nubes (0.1%). Esto hace

notar que más del 50% de la cuenca ha sido perturbada por las actividades humanas (Tabla 22, Fig. 59).

Tabla 22. Superficie de las coberturas del terreno de la Cuenca de México, 2008.

Cobertura	Superficie	
	km ²	%
Agropecuario	3453.11	35.9
Asentamientos humanos	2240.75	23.3
Bosques	1844.15	19.2
Matorral	1478.89	15.4
Suelo desnudo	328.42	3.4
Cuerpos de agua	149.42	1.6
Pastizal de alta montaña	98.25	1.0
Nubes	5.85	0.1

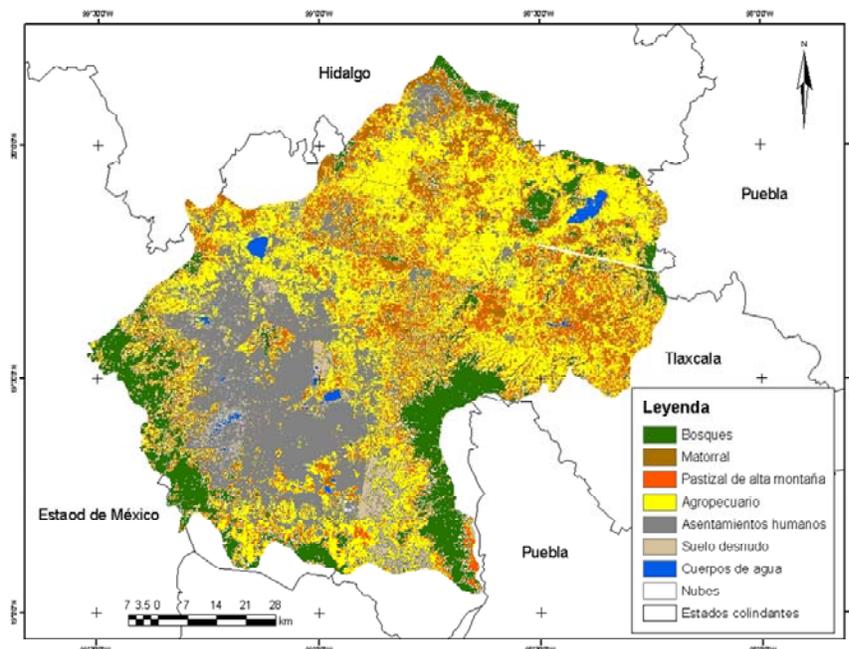


Fig. 59. Vegetación y uso de suelo de la Cuenca de México, 2008.

8.5 Pérdida de cobertura natural por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH

La rápida transformación de las superficies forestales en agropecuarias o urbanas ha sido uno de los procesos más comunes en algunas regiones del país en los últimos 30 años (Landa *et al.*, 1998; Velásquez *et al.*, 2002; Salazar *et al.*, 2004; citados por Castelán *et al.*, 2007)

La deforestación en México se estima por la FAO (1995) en 508,000 ha/año, lo que nos ubica en el cuarto lugar a nivel mundial, siendo los desmontes ilegales los responsables del 90% de ésta y el 10% restante los incendios, la tala clandestina y las plagas forestales (SEMARNAP, 1998).

México, de acuerdo con la media mundial, debería tener 0.7 ha de cubierta forestal *per cápita*, pero en la práctica se calcula que alberga sólo 0.5 ha *per cápita* y las predicciones a 2025 indican que contará con 0.3 ha *per cápita* (Masera, 1996; Velásquez *et al.*, 2001, citados por Velásquez *et al.*, 2002).

En el caso de la Cuenca de México, las áreas forestales han quedado limitadas al norte y al sur de la Ciudad de México por el crecimiento de los asentamientos humanos, lo que ha ocasionado que algunas poblaciones de animales y plantas se encuentren restringidas a relictos de bosques (Velásquez y Romero, 1999).

Algunas de estas especies son el tlalcoyote (*Taxidea taxus*), la zorra (*Urocyon cinereoargenteus*), el gato montés (*Lynx rufus*), el puma (*Puma concolor*), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), la gallina de monte (*Dendrortyx macroura*), la víbora de cascabel (*Crotalus transversus*) y la megarroseta (*Furcraea hendinghausii*), las cuales están seriamente amenazadas con desaparecer de la región (*op. cit.*).

Entre las especies endémicas cuya distribución biogeográfica a nivel específico está restringida a la región de montaña del sur de la Cuenca de México, que se encuentran al borde de la extinción por la reducción de las áreas forestales están, el conejo zacatuche (*Romerolagus diazi*), una tuza del género *Cratogeomys*, varias especies de lagartijas del género *Sceloporus*, el gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*) y las colonias de la megarroseta *Furcraea bendinghausii*, entre otras (*op. cit.*).

Lo encontrado en este estudio no mejora el panorama, pues el crecimiento seguirá comprometiendo la permanencia de los recursos naturales de la Cuenca, pudiendo afectar al año 2035, el 4.2% ó 4.3% (E1 y E2) de la superficie total de los bosques y el 11.2% u 11% de matorrales (Tabla 23).

La cobertura que presentó mayor pérdida en el 2020 (E1 y E2) en la Cuenca fue Agropecuario (7,568 ha), seguida de Matorrales (7,568 ha) y Suelo desnudo (6,658 ha). Bosques fue la que tuvo el valor más bajo (4,993 ha; Tabla 23). El que no exista diferencia entre los dos escenarios, nos indica que todavía existen zonas más accesibles y sin restricciones al establecimiento de los asentamientos humanos, por lo que los OET's no son el factor que determina el crecimiento de estos.

Al 2035 en ambos escenarios puede mostrarse el mismo orden en pérdida, pero en el caso de Matorrales y Agropecuario, ésta es más del doble del 2020 siendo mayor en el E1, lo que indica que los asentamientos se dirigieron principalmente a estas coberturas (Tabla 23).

Suelo desnudo para el 2035, es la cobertura que tiene el mayor porcentaje de su superficie invadida por los asentamientos humanos (31.4% en el E1 y 31% en el E2) y Bosques es el que presenta el menor (4.2% en el E1 y 4.3% en el E2; Tabla 23).

De todas las coberturas, la única que presenta mayor pérdida en el E2 con respecto al E1 es Bosques, lo que nos permite confirmar que en estos las restricciones al crecimiento de los asentamientos humanos en los OET's, sí son un factor que determina su avance, dirigiéndose hacia los matorrales y zonas agropecuarias, siendo el Distrito Federal el que tuvo mayor invasión en el E2 (10.3%; Tabla 23).

8.5.1 Pérdida de cobertura en el Distrito Federal

De 2008 a 2020 se espera que la superficie de bosques del Distrito Federal pierdan 2,337 ha (7.7%; Tabla 23) en ambos escenarios, lo que indica que las restricciones impuestas por el OET no son un factor que limite el avance de los asentamientos, por lo que se debe de planear una estrategia que evite su crecimiento hacia estas zonas.

Lo anterior es preocupante pues del 100% de especies de pino y encino que existen en la Tierra, el 85% y 70%, respectivamente, son endémicas de México y se encuentran en esta zona (Semarnap-INE-Conabio, 1995, citados por Palma et al., 1999). Además Velázquez y Romero (1999) mencionan que la región de montaña sur de la Cuenca de México, alberga un total del 30% de la mastofauna del país, y que al menos el 10% de la avifauna de México está representada en ésta. En ella residen alrededor de 325 especies de plantas y animales endémicas y cerca del 2% del germoplasma mundial se restringe a esta zona.

También en ellos se infiltra alrededor del 85% de la precipitación (Palma et al., 1999).

Para el 2035 los bosques perdieron 9% en el E1 y 10.3% en el E2 de su superficie (Tabla 23), lo que indica que hay menor invasión de 2020 a 2035 que de 2008 a 2020.

Al comparar los dos periodos, se puede concluir que para el 2035 las zonas boscosas ya no son tan accesibles, esto se confirma al comparar la pérdida de superficie boscosa y agropecuaria.

En el E1 los bosques tuvieron un decremento del 9% y las áreas agropecuarias 16.9% y en el E2 los primeros perdieron 10.3% y las segundas 23.6%, es decir, mientras que en los bosques la diferencia entre escenarios fue de 1.3%, en las zonas agropecuarias fue de 5.7% (Tabla 23), lo que indica que los asentamientos avanzaron en mayor proporción hacia estas últimas y por lo tanto, los bosques ya no son la mejor opción para el crecimiento, seguramente por el relieve.

Lo anterior se afirma observando las delegaciones que concentran la mayor parte de la actividad agrícola del Distrito Federal (Xochimilco, Tlalpan, Milpa Alta y Tláhuac; Cruz,

2002), que también son las que presentan el mayor crecimiento al 2035 en el E1 y E2 (sección 8.1.2.2).

La dinámica antes descrita de las áreas agropecuarias también se observa en los matorrales, que al 2020 perdieron 31.4% de su superficie en los dos escenarios y al 2035, 34.1% en el E1 y 42.3% en el E2, una diferencia de 8.2% entre escenarios, superior a la encontrada en bosques (1.3%), lo que indica que los asentamientos también se dirigieron hacia los matorrales pero en menor proporción que en las zonas agropecuarias (Tabla 23).

La mayoría de las zonas agropecuarias del Distrito Federal se encuentran dentro del suelo de conservación, por lo que es importante poner atención a éstas para evitar su invasión, ya que de no seguirse las restricciones impuestas por el OET, pueden ser habitadas.

El suelo de conservación del Distrito Federal cuenta con alrededor 50,000 ha de vegetación que incluye bosque de *Abies religiosa*, de *Pinus sp.*, de *Quercus sp.*, matorrales xerófilos y pastizales de alta montaña; estos tienen importancia ambiental al mantener el ciclo del agua, la estabilidad de los suelos, la captura de carbono y la retención de polvo producto de la contaminación y de incendios forestales (GDF, 2000), dichos servicios se verán afectados y disminuidos por el crecimiento pronosticado.

8.5.2 Pérdida de cobertura en el Estado de México

En los dos escenarios del 2020, el Estado de México pierde de bosques casi lo mismo (2,311 ha) que el Distrito Federal (2,337 ha) siendo superior en el segundo. En el 2035, el decremento de superficie es mayor en el E1 (Tabla 23).

En las zonas agropecuarias y matorrales, se observa el mismo fenómeno, mayor pérdida en el E1 que en el E2, lo que indica que las restricciones del OET no son un factor que determine el crecimiento de los asentamientos, en este caso la accesibilidad es el fundamental.

Esto se confirma con lo encontrado por Pineda *et al.* (2009) en un estudio de cambio de uso de suelo del Estado de México, quienes mencionan que la distancia a zonas urbanas no influye en la pérdida de bosques, pero sí la distancia a vías de transporte (a mayor distancia menor pérdida de masa forestal). De igual forma cuando la pendiente aumenta cinco grados disminuye la pérdida de bosque.

Con lo anterior se puede explicar el que las zonas agropecuarias son las que presentan mayor invasión por los asentamientos (34, 920 ha en el E1; Tabla 23) ya que estas se encuentran en zonas planas y cercanas a la frontera con los asentamientos humanos.

Esto debe de tomarse en cuenta pues en Ixtapaluca se produce avena forrajera, trigo, frijol y maíz; en Tecamac la cebada y el maíz y en Nicolás Romero, Cuautitlán Izcalli y Naucalpan el maíz (Cruz, 2002) y son estos municipios donde se presentó el mayor incremento de los asentamientos humanos al 2035.

8.5.3 Pérdida en Hidalgo y Tlaxcala

En Hidalgo y Tlaxcala la pérdida de bosques es mucho menor que en el Distrito Federal y Estado de México.

En Hidalgo en el 2020 la pérdida es la misma, y se puede decir que todavía existen áreas sin restricción que pueden ser pobladas y se comprueba al observar las zonas agropecuarias y los matorrales, que son las que muestran mayor invasión, siendo superior en los segundos (Tabla 23).

En el 2035 el crecimiento de los asentamientos es mayor en el E1 y se invierten los papeles, pues las zonas agropecuarias tienen mayor pérdida que los matorrales en ambos escenarios (Tabla 23).

En Tlaxcala las zonas agropecuarias son las que tienen mayor pérdida al 2020 y 2035, siendo en este último año, el E1 superior al E2 (Tabla 23).

Tabla 23. Pérdida de superficie de la cobertura natural de la Cuenca de México, por el crecimiento de los asentamientos humanos modelado con SLEUTH.

Cobertura	Superficie total ha	Superficie que se perderá							
		E1				E2			
		2020		2035		2020		2035	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
Bosques									
Distrito federal	30,188.62	2,337	7.7	2,723	9	2,337	7.7	3,120	10.3
Estado de México	102,202.96	2,311	2.3	4,059	4	2,311	2.3	3,848	3.8
Hidalgo	34,922.94	320	0.9	772	2.2	320	0.9	798	2.3
Tlaxcala	14,755.99	25	0.2	99	0.7	25	0.2	80	0.5
Total	182,070.51	4,993	2.7	7,653	4.2	4,993	2.7	7,846	4.3
Matorral									
Distrito federal	3,105.51	974	31.4	1,060	34.1	974	31.4	1,313	42.3
Estado de México	55,532.23	3,877	7	8,803	15.9	3,877	7	8,474	15.3
Hidalgo	69,306.74	2,460	3.5	5,733	8.3	2,460	3.5	5,640	8.1
Tlaxcala	19,082.75	257	1.3	829	4.3	257	1.3	759	4
Total	147,027.23	7,568	5.1	16,425	11.2	7,568	5.1	16,186	11
Agropecuario									
Distrito federal	22,852.23	3,168	13.9	3,863	16.9	3,168	13.9	5,385	23.6
Estado de México	161,312.56	15,826	9.8	34,920	21.6	15,826	9.8	33,841	21
Hidalgo	115,487.94	2,338	2	7,202	6.2	2,338	2	6,865	5.9
Tlaxcala	41,056.91	504	1.2	1,711	4.2	504	1.2	1,551	3.8
Total	340,709.64	21,836	6.4	47,696	14	21,836	6.4	47,642	14
Suelo desnudo									
Distrito federal	181.50	171	94.2	176	97	171	94.2	177	97.5
Estado de México	27,922.49	6,033	21.6	9,266	33.2	6,033	21.6	9,143	32.7
Hidalgo	4,085.07	445	10.9	771	18.9	445	10.9	762	18.7
Tlaxcala	459.39	9	2	34	7.4	9	2	30	6.5
Total	32,648.45	6,658	20.4	10,247	31.4	6,658	20.4	10,112	31

8.6 Ideas generales de la discusión

Del periodo de tiempo estudiado (1985-2008), 1985-1995 fue el que presentó mayor crecimiento, dándose principalmente en el Distrito Federal y Estado de México.

Los asentamientos humanos en el 2008 ocuparon el 19.54 % del área total de la cuenca y el crecimiento se dio principalmente en el Distrito Federal, Estado de México e Hidalgo.

Tanto en el 2020 como en el 2035 en la Cuenca de México, las restricciones impuestas por los OET's no son una limitante en el crecimiento de los asentamientos, dándose principalmente en el Estado de México, Hidalgo y Distrito Federal.

Al año 2035 los asentamientos ocuparon el 27.2% de la cuenca.

En el Distrito Federal al año 2008 los asentamientos humanos cubrieron el 52.3% de su territorio. El crecimiento ocurrió principalmente en Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco.

Al año 2020 en el Distrito Federal, todavía existen áreas que no tienen restricciones para el crecimiento de los asentamientos humanos. Éstas se localizan principalmente en las delegaciones del sur Álvaro Obregón, Tláhuac y Xochimilco. La delegación Venustiano Carranza quedó totalmente cubierta.

En el 2035, el OET en el Distrito Federal sí juega un papel determinante en el establecimiento de los asentamientos humanos. El crecimiento en el E1 se dio hacia Álvaro Obregón, Xochimilco y Tlalpan y en el E2 en Xochimilco, Tláhuac y Tlalpan.

En el Estado de México al año 2008 los asentamientos humanos ocuparon el 21.3% de su territorio, siendo los municipios de Tecamac, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Zumpango, Texcoco y Naucalpan de Juárez los que presentaron mayor incremento.

En el Estado de México al año 2035 todavía hay áreas sin restricciones que son más accesibles para los asentamientos humanos. El crecimiento se dio en Texcoco, Zumpango, Tecamac, Chalco, Cuautitlán Izcalli, Huehuetoca, Nicolás Romero, Teotihuacán, Acolman, Tepotzotlán, Atizapán de Zaragoza, Temascalpa, Otumba, Ixtapaluca, Axapusco, Huixquilucan y Teoloyucan.

En 1995 en Pachuca de Soto casi se triplicó el área de los asentamientos, ocupando el 2° lugar en incremento de todos los municipios de la Cuenca de México.

En Hidalgo en el año 2008 los asentamientos humanos ocuparon el 5.6% del territorio del estado. Los municipios con mayor crecimiento fueron Mineral de la Reforma, Tizayuca, Pachuca de Soto, Zempoala y Tepeapulco.

En el 2035 todavía existen áreas sin restricciones que pueden ser invadidas por los asentamientos humanos. El crecimiento se dio principalmente en Zempoala, Tizayuca,

Mineral de la Reforma, Pachuca de Soto, Apan, Tepeapulco, Zapotitlán de Juárez y Epazoyucan.

Tlaxcala y Puebla fueron los estados que presentaron menor crecimiento de 1985 a 2008, dándose principalmente en Calpulalpan y Tlaxco, en el primero, y en Chignahuapan, en el segundo.

Al año 2020 todavía existen áreas sin restricción para el crecimiento que pueden ser invadidas por los asentamientos. El crecimiento se dio principalmente en Tlaxco, Calpulalpan, Hueyotlipan y Nanacamilpa de Mariano Arista.

Tlaxcala presentará de 2020 a 2035 un incremento nunca observado, dándose principalmente en áreas sin restricciones para ser invadidas por los asentamientos, principalmente en Tlaxco y Calpulalpan. Puebla presenta la misma tendencia que de 1985-2008.

Desde la creación de los Ordenamientos Ecológicos Territoriales de los estados que conforman la cuenca, al 2008 se ha perdido el 6.7% de la superficie destinada a la conservación y el 5.2% de protección, siendo mayor la invasión por los asentamientos en el Estado de México y Distrito Federal.

En el Estado de México y en el Distrito Federal, al año 2008 se ha perdido mayor superficie de áreas de conservación que de protección, en Hidalgo la situación es al revés.

En el 2020 las restricciones al crecimiento impuestas por las Unidades de Gestión Ambiental, no es un factor que lo limite, siendo las áreas de conservación las más susceptibles a ser invadidas por los asentamientos humanos que las de protección.

En el 2035 las restricciones de los OET's, sí impiden el establecimiento de los asentamientos en las zonas destinadas a la conservación y protección en la Cuenca de México.

En el Distrito Federal, Estado de México e Hidalgo, al año 2035, las restricciones impuestas en el OET sí impiden el crecimiento de los asentamientos humanos en las zonas de conservación y protección.

Fuentes Brotantes de Tlalpan e Histórico de Coyoacán al 2008 han perdido el 100% de su superficie.

De la superficie establecida en el decreto del Parque Nacional Cerro de la Estrella, en el 2008 ya ha sido invadido el 84.2% de su superficie y, de no seguirse las las restricciones de crecimiento, puede perderse el 93.8%.

El Parque Nacional Los Remedios ha perdido al año 2008, el 75.8% de su territorio. En el 2035 se espera que de no seguirse las restricciones impuestas por el decreto, pierda 98.1%.

El Parque Nacional Lomas de Padierna en el 2008 ha perdido el 58.5% de su superficie. En éste la normatividad no es el factor determinante en el incremento de los asentamientos, sino la accesibilidad, ya que es una zona con relieve altamente accidentado y con pocos caminos.

El Parque Nacional El Tepeyac al 2008 ha sido invadido el 40.8% de su territorio. Al 2020 los asentamientos no muestran crecimiento, pero si al año 2035 no se siguen los lineamientos establecidos por el decreto, el parque puede perder el 45% de su superficie.

El Parque Nacional Sacromonte es el que ha tenido menor pérdida en superficie. Se espera que de cumplirse lo modelado al 2035 se perderá el 48.2% de su superficie. En este parque las políticas ambientales establecidas no serán un factor determinante en impedir el establecimiento de los asentamientos humanos, pues el crecimiento sólo puede darse en él.

El Parque Nacional Molino de las Flores no presenta invasión de su territorio por los asentamientos humanos de 1985 a 2008, pero en el 2035 estos lo alcanzarán, perdiéndose el 11.4% de no aplicar las políticas de restricción del crecimiento.

Al año 2008, más del 50% de la cuenca ha sido perturbada por las actividades humanas.

En el 2020 las zonas que presentaron mayor invasión por los asentamientos en la Cuenca de México fueron las de uso agropecuario, le siguieron los matorrales, suelo desnudo y por último los bosques.

Al 2035 la política ambiental sí es un factor que limite el crecimiento de los asentamientos humanos en los bosques.

Los asentamientos humanos en el 2035, avanzan principalmente a las zonas agropecuarias y los matorrales, perdiéndose más del doble de superficie que de 2008 a 2020.

De no seguirse las políticas de protección y conservación, se puede perder el 10% de los bosques, 23.6% de zonas agropecuarias y el 42.3% de matorrales del Distrito Federal.

Al 2035 las zonas boscosas del Distrito Federal ya no son tan accesibles como las agropecuarias y los matorrales.

En el Estado de México en el 2020 se pierde de bosques un poco menos que en el Distrito Federal en el mismo año. Para el 2035 la superficie invadida es casi el doble del 2020.

Los asentamientos humanos en el Estado de México avanzaron principalmente a las zonas agropecuarias y a los matorrales.

En Hidalgo en el 2020 todavía existen áreas sin restricción que pueden ser pobladas, siendo los matorrales los que muestran mayor invasión, seguidos de las zonas agropecuarias.

En el 2035 el crecimiento de los asentamientos es mayor en las zonas agropecuarias que en los matorrales y al igual que en el 2020 todavía existen áreas sin restricción que pueden ser pobladas.

En Tlaxcala las zonas agropecuarias son las que tienen mayor pérdida al 2020 y 2035.

9. CONCLUSIONES

Los asentamientos humanos han cubierto el 19.54 % del área total de la cuenca y más del 50% de ésta ha sido perturbada por las actividades humanas, perdiéndose el 6.7% de la superficie destinada a la conservación y el 5.2% de protección, afectando principalmente los Parques Nacionales Fuentes Brotantes de Tlalpan, Histórico de Coyoacán, Cerro de la Estrella, Los Remedios, Lomas de Padierna, El Tepeyac y Sacromonte.

Para el 2020 los asentamientos humanos pueden abarcar hasta el 20.8% de la superficie de la cuenca y en el 2035 el 27.2%, avanzando principalmente a zonas de uso agropecuario y matorrales, comenzando a afectar al Parque Nacional Molino de las Flores.

En la Cuenca de México tanto los ordenamientos territoriales como los decretos de ANP's, no han evitado el crecimiento de los asentamientos humanos en las áreas de conservación y protección, y de acuerdo a lo encontrado en este estudio, si no se modifica esta dinámica, el crecimiento seguirá afectando estas zonas.

De los estados que conforman la Cuenca, el Distrito Federal es el que debe de aplicar con mayor rigor el ordenamiento ya que de no hacerlo, el crecimiento se dará principalmente en el Suelo de Conservación, afectando zonas que son necesarias para los habitantes de la Ciudad de México por los servicios ambientales que brindan.

El modelo SLEUTH permitió observar la dinámica de crecimiento de los asentamientos humanos en la Cuenca de México a futuro, identificar las áreas vulnerables a la invasión y cuantificar la pérdida de cobertura natural. También fue posible determinar las implicaciones que tendrán las políticas de restricción de crecimiento en el incremento de los asentamientos humanos de la Cuenca, al modelar dos escenarios (uno optimista, con restricciones de los OET's y uno pesimista, sin restricciones).

En este trabajo, el modelo SLEUTH proyectó el crecimiento a un tamaño de celda de 1 ha, pues al reducir la superficie de la misma ($2,500 \text{ m}^2$), SLEUTH se volvía ineficiente, tardando hasta 1 mes en hacer la calibración bruta, por lo tanto, sería interesante llevar a cabo una predicción con un tamaño de celda menor y reduciendo el área de estudio, para obtener resultados más finos y representativos.

11. REFERENCIAS

Autodesk. Chapter 1-DXF Format.

http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/dxf_format.htm. Consultado el 27/08/2009.

Boege, E. 2004. *Manual para la gestión ambiental comunitaria, uso y conservación de la biodiversidad de los campesinos indígenas de América Latina*. http://www.cdi.gob.mx/pnuma/c4_03.html. Consultado el 26/05/2009.

Bojórquez, L., G. Cruz-Bello, L. Luna-González, L. Juárez, M. Ortiz-Pérez. 2009. V-DRASTIC: Using visualization to engage policymakers in groundwater vulnerability assessment. *Journal of Hydrology*. 373:242-245.

Breceda, M. 2004. Agua y Energía en la Ciudad de México (Visión en 2004). *Seminario Internacional del Agua ¿Bien privado o bien común?*. Universidad de la Ciudad de México. 29 p.

Breña A. y J. Breña. 2004. *Disponibilidad y ahorro de agua en la Cuenca del Valle de México*. UAM-Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. http://www.ecomundo.com.mx/download/disponibilidad_del_agua_en_la_cuenca_vm.pdf . Consultado el 25/05/2009.

Brooks E. y J. Grossman. 2004. *Improved Algorithms Speed it up for codes*. *Science & Technology*. <https://www.llnl.gov/str/May04/Brooks.html>. Consultado el 18/05/2009.

Cabrera, G. 2007. *Obras demográficas selectas*. 1ª edición. El Colegio de México. México. 784 p.

Caravaca, I. y J. Cruz. 1993. Crecimiento urbano y marginación social en Latinoamérica: actualizaciones espontáneas y políticas de intervención. *Boletín de la A.G.E.* 15-16:133-157.

Carrera, J. 2000. *Balance hidrológico-hidráulico de la cuenca del Valle de México y perspectivas sobre su evolución futura*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. 153 pp.

Castelán, R., J. Ruiz, G. Linares, R. Pérez, V. Tamariz. 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 64:75-89.

Clarke, K., L. Gaydos, S. Hoppen. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design* 1997. 24:247–261.

Clarke, K., N. Gazulis, C. Dietzel, N. Goldstein. 2007. A decade of sleuthing: Lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model. *Twenty years of the*

international journal of geographical information systems and science. Ed. Fhisher. E U A. 413–425 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008. *Acerca de la Cuenca*.

<http://www.conagua.gob.mx/OCAvm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=4e5056ed-f861-4884-ada5-8626bf3ba92c|Acerca%20de%20la%20Cuenca|0|6|0|0|0>. Consultado el 11/05/2009.

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2007. *Qué hacemos*.

http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/. Consultado el 4/02/2010.

Cruz, M. 2000. Crecimiento urbano y doblamiento en la ZMCM. El perfil del nuevo milenio. *El cotidiano*. 17(103):43-53.

Cruz, M. 2002. Procesos urbanos y ruralidad en la periferia de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 49:39-76.

Dávila, H., R. Constantino, C. Pérez. 2007. Metropolización y segregación en la ciudad de México. Capítulo VIII en *Metropolización, concentración económica y desigualdades espaciales en México y Francia*. UAM-X, CSH, Depto. de Producción Económica 1ra edición. UAM, México. 103-128 pp.

Delgadillo, M. 2009. Reseña de “Los desafíos del Bando 2. Evaluación multidimensional de las políticas habitacionales en el D. F.; 2000-2006” de Sergio Tamayo. *Economía, Sociedad y Territorio*. IX(29): 209-220.

DOF (Diario Oficial de la Nación). 1936. *Decreto que establece el Parque Nacional "Fuentes Brotantes de Tlalpan" en terrenos del antiguo rancho de Teochihuitl, D.F.*

<http://www.cemda.org.mx/infoarnap/instrumentos/decretos/fuentestlalpan.htm>. Consultado el 14/01/2010.

Erdas. 1999. *ERDAS Field Guide*. 5ª edición. E U A. 644 pp.

ESRI. 1998. *ESRI Shapefile Technical Description*.

<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>. Consultado el 7/10/2009.

Ezcurra E. 1996. *De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la Cuenca de México*. 4ª impresión. Fondo de Cultura Económica, S.A de C.V. México. 120 p.

Fernández A., A. Vázquez, F. Uribe, J. Bustillos, H. Aguilar, M. Juárez, B. de Jesús, I. Ramírez, R. López, M. Rodríguez, J. Vera. 2007. *Ecoturismo y desarrollo económico sustentable en la delegación La Magdalena Contreras, Distrito Federal*.

<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/432/ecoturismo.html>. Consultado el 4/02/2010.

Fornes, M. 2006. *rh4_060825_Game of Life*. Theverymany (Territory for design (AND/AS/FOR/FROM) research via Rhinoscripting).

<http://www.theverymany.net/labels/CA.html>. Consultado el 12/03/2009.

Gardner M. 1970. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American* 223:120-123.

GDF. 2000. *Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal 2000-2003*. México. 133 p.

GET (Gobierno del Estado de Tlaxcala), Coordinación General de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Consultoría Productividad y Medio Ambiente, S.A. de C.V. 2002. Ordenamiento Ecológico de Tlaxcala.

GODF (Gaceta Oficial del Distrito Federal). 2005. Decreto por el que se declara como Área Natural Protegida, bajo la categoría de Zona Ecológica y Cultural, la superficie conocida como "Cerro de la Estrella". México. 129:5-20 pp.

Goldstein, N.C. 2004. Brains vs. brawn – Comparative strategies for the calibration of a cellular automata-based urban growth model. *GeoDynamics*, Ed. P. Atkinson, G. Foody, S. Darby, and F. Wu. Boca Raton: CRC Press.

Graizbord, B. 2007. Megaciudades, globalización y viabilidad urbana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 63:125-140.

Gutiérrez, M. T., J. González, J. Zamorano. 2005. La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales. *Temas selectos de geografía*. Atlántida Coll-Hurtado, Instituto de Geografía, UNAM. México. 155 p.

Hakan, O., A. Klein, R. Srinivasan. 2007. Using the Sleuth Urban Growth Model to Simulate the Impacts of Future Policy Scenarios on Urban Land Use in the Houston-Galveston-Brazoria CMSA. *Research Journal of Social Sciences*, 2:72-82.

Henríquez, C. y G. Azócar. 2007. Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona. XI: 245. 41. <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-24541.htm>> [ISSN: 1138-9788]. Consultado el 1/12/2008.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. Cuaderno estadístico de la Zona Metropolitana del Valle de México.

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) y CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 1995. Edafología. Escalas 1:250 000 y 1:1,000,000. México.

Juárez G. 2006. *Introducción a la simulación de procesos con autómatas celulares*. <http://parts.mit.edu/wiki/index.php/IPN> UNAM 2006. Consultado el 12/03/2009.

Lazcano, M. M. 2005. Acceso al suelo y a la vivienda de los sectores informales: el caso de la Ciudad de México. *Revista INVI*. 20(054):18-54.

Martínez G., A. Menchaca, M. Mecate. 2005. Un subconjunto de autómatas celulares con comportamiento complejo en dos dimensiones. <http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/papers.html>. Consultado el 12/03/2009.

Minsky M. 1967. *Computation: Finite and Infinite Machines*. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ. EUA. 311 p.

MMC (Modelación Matemática y Computacional). 2006. *Introducción a los modelos dinámicos*. <http://mmc.geofisica.unam.mx/Bibliografia/Matematicas/ODE/>. Consultado el 12/03/2009.

Mollá, M. 2006. El crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas protegidas. La delegación Tlalpan. *Investigaciones Geográficas*. 60:83-109.

Mora J. 2003. *Análisis del crecimiento urbano del Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Periodo de 1983-2000*. Tesis de Maestría Centroamericana en Geografía. <http://geobuzon.fcs.ucr.ac.cr/jmoratesis.htm>. Consultado el 8/01/10.

National Research Council (NRC), Academia de Investigación Científica, A. C., Academia Nacional de Ingeniería, A. C. 1995. *El suministro de agua de la Ciudad de México. Mejorando la sustentabilidad*. National Academy Press. Washington, D. C.

Oğuz, H. 2004. *Modeling urban growth and land use/land cover change in the Houston metropolitan area from 2002 – 2030*. Tesis doctoral. Universidad de Texas A&M.

Palma, M., A. Velásquez, F. Romero, G. Bocco. 1999. Zonificación de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad: el caso de la región de montaña del sur de la Cuenca de México. Capítulo 13 en *Biodiversidad de la Cuenca de México*. México. 288-301 pp.

Pineda, N., J. Bosque, M. Gómez, W. Plata. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 69:33-52.

Rossete, F. 2007. *Unidades de gestión ambiental e instrumentos económicos*. INE. <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/estudios/397/rosete.html>. Consultado el 26/05/2009.

Rueda, L. y D. Willmer. 2007. Modelamiento inicial de ciudades de países en vía de desarrollo, utilizando dinámica de sistemas. *Scientia et Technica* Año XIII, Universidad Tecnológica de Pereira. 34:421-426.

Salinas, E., R. González, J. Quintela, R. Montiel, J. Domínguez, V. Escalante, A. Conde, F. Chávez, L. Serrano, A. Cuevas, A. Rodríguez, H. García, J. Pablo, J. Romo, F. Damián, A. Damián. 2001. *Ordenamiento Ecológico Territorial, Estado de Hidalgo*. 307 p.

Science for a changing World (USGS). . *Project Gigalopolis: Urban and Land Cover Modeling*. http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/project_gig.htm. Consultado el 27/05/2009.

SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) 1998. *Diagnóstico de la deforestación en México*.

<http://www.ccmss.org.mx/documentos/diagnosticosemarnat.doc>.

Consultado el 12/01/2010

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2004. *Convenio de Coordinación para el Ordenamiento Ecológico de la Cuenca de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental; Dirección General de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial.

http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/ordenamientoecologico/Documents/documentos%20integracion/cuenca_mexico_integracion.pdf. Consultado el 1/12/2008.

Serrano, F. 2008. *Sobre la dinámica de usos de suelo en el entorno urbano: modelado y simulación*. Tesis de Maestría en Geomática. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C. 161 p.

Soto, E., M. Mazari, L. Bojórquez. 2000. Entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 43:50-75.

Suárez, M. y J. Delgado. 2007. La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativas para el año 2020. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 22(1):101-142.

Tapia-Varela, G. y J. López-Blanco. 2002. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 19(1):50-65.

Treviño, J. 2005. *Medidas normativas que prevean, regulen y resuelvan la problemática de escasez del agua en la cuenca del Valle de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Derecho, UNAM. 266 p.

Torres, G. y G. Hernández. 1994. Autómatas celulares estocásticos. *Lecturas Matemáticas*. 15:167-191.

USGS. 2003. Project Gigalopolis: *Urban and Land Cover Modeling*. <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>. Consultado el 04-06/2009.

Vargas, F. 1997. *Parques Nacionales de México. Volumen II: Zonas Norte y Sur*. Textos INE. México. 760 p.

Velázquez A. y J. Romero. 1999. La Región de la Montaña del Sur de la Cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. Capítulo 1 en *Biodiversidad de la Cuenca de México*. México. 39-48 pp.

Velásquez, A. 2001. *Proyecto ejecutivo de las bases para la reestructuración del Sistema de Áreas Naturales Protegidas del D. F.* Instituto de Geografía, UNAM; Gobierno del Distrito Federal. México.

http://www.igeograf.unam.mx/ua_morelia/_private/proyectos/gdf/capitulo/1/1_4.html. Consultado el 11/12/09.

Velásquez A., F. Mas, J. Díaz, R. Mayorga, P. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, J. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México. *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. D. F. 062:21-37.

Villarreal, D. R. G., F. A. Aguirre. 2003, *Dinámica demográfica y reestructuración económica en la zona metropolitana de la Ciudad de México 1988-1998*. <http://prodeco.xoc.uam.mx/web/libros/2003/dos/pdf/03-02-05.pdf>. Consultado el 18-21 /09/09

Zamorano J., L. Tanarro, J. Lugo, G. Sánchez. 2002. Evolución geológica y geomorfológica del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 19(01):66-79.

10. ANEXOS

ANEXO1

Listado de Cartas Topográficas ó de Uso de suelo empleadas para la digitalización de áreas urbanas de los años 80's.

Clave	Nombre	Fecha y fuente
		80's
F14D82	Tulancingo	83, 1a ed. V.76. Topográfica. INEGI
F14D81	Pachuca	82, 1a ed. V.76. Topográfica. SPP
E14A19	Zumpango de Ocampo	85, 2a ed. V.82. Topográfica. INEGI
E14B11	Tizayuca	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B12	Ciudad Sahagún	83, 1a ed. V.77. Uso de suelo. SPP
E14B13	Chignahuapan	83, 1a ed. V. 72. Topográfica. INEGI
E14A28	Villa del Carbón	76, 1a ed. V.70. Uso de suelo. CETENAL
E14A29	Cuautitlán	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B21	Texcoco	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B22	Apan	81, 1a ed. V. 73. Topográfica. SPP
E14B23	Tlaxco	82, 1a ed. V.71,75. Topográfica. INEGI
E14A38	Toluca de Lerdo	
E14A39	Ciudad de México	85, 3a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B31	Chalco	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B32	Mariano Arista, San Martín Texmelucan	82, 1a ed. V.71,75. Topográfica. INEGI
E14B33	Tlaxcala de Xicohtencatl	82, 1a ed. V.79. Topográfica. INEGI
E14A49	Milpa Alta	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B41	Amecameca de Juárez	85, 2a ed. V.83. Topográfica. INEGI
E14B42	Huejotzingo	

ANEXO 2

Imágenes SPOT empleadas para la digitalización del área urbana y clasificación de vegetación y uso de suelo

Imágenes SPOT 4 del año 2001.

Fecha	Imagen	# de bandas	Bandas
29/03/2001	587-308	1	Pancromática
22/07/2001	587-309	1	Pancromática
08/11/2001	587-310	1	Pancromática
29/03/2001	588-309	1	Pancromática
29/03/2001	588-310	1	Pancromática
04/03/2001	588-311	1	Pancromática
04/03/2001	588-312	1	Pancromática
15/04/2001	589-310	1	Pancromática
08/11/2001	589-311	1	Pancromática
15/03/2001	589-312	1	Pancromática
16/05/2001	590-310	1	Pancromática
16/05/2001	590-311	1	Pancromática

Imágenes SPOT 5 de los años 2007-2008.

Fecha	Imagen	# Bandas	Bandas	# P. C.	RMS
29/11/2008	587-311	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	37	11.0279
13/02/2007	588-310	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	20	7.1433
22/01/2008	588-312	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	20	11.5209
03/10/2008	589-310	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	50	5.025
30/12/2008	589-311	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	81	24.6377
07/01/2008	589-311b	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	50	8.2671
30/12/2008	589-312	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	20	15.9676
15/12/2008	590-310	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	21	36.6843
15/12/2008	590-312	4	XS1, XS2, XS3, SWIR	11	12.6344
29/11/2008	587-311	1	Pancromática	37	11.0279
13/02/2007	588-310	1	Pancromática	20	7.1433
22/01/2008	588-312	1	Pancromática	20	11.5209
03/10/2008	589-310	1	Pancromática	50	5.025
07/01/2008	589-311	1	Pancromática	50	8.3974
30/12/2008	589-311	1	Pancromática	81	24.6377
30/12/2008	589-312	1	Pancromática	20	15.9676
15/12/2008	590-310	1	Pancromática	21	36.6843
15/12/2008	590-312	1	Pancromática	11	12.6344

ANEXO 3

Coefficientes obtenidos de la calibración bruta (Coarse), fina (Fine), final (Final) y de predicción (Forecasting) del E1. Primeras 10 corridas con los valores más altos en el índice Lee-Salle (Leesalee).

Calibración bruta (Coarse)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
40	0.73966	1	1	25	75	1
41	0.7392	1	1	25	75	25
45	0.73903	1	1	25	100	1
42	0.73893	1	1	25	75	50
43	0.73893	1	1	25	75	75
44	0.73893	1	1	25	75	100
47	0.73887	1	1	25	100	50
48	0.73887	1	1	25	100	75
49	0.73887	1	1	25	100	100
35	0.73879	1	1	25	50	1

Calibración fina (Fine)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
146	0.74358	1	1	20	75	10
144	0.74353	1	1	20	75	1
145	0.74353	1	1	20	75	5
155	0.74334	1	1	20	80	25
149	0.74321	1	1	20	75	25
154	0.743	1	1	20	80	20
360	0.74294	1	5	20	75	1
361	0.74294	1	5	20	75	5
147	0.74291	1	1	20	75	15
370	0.74284	1	5	20	80	20

Coefficientes: Diff -difussion (dispersión); Brd – breed (reproducción); Sprd – spread (propagación); Slp – slope (resistencia-pendiente); RG - road-gravity (camino-gravedad).

Calibración final (Final)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
77	0.74358	1	1	20	75	10
82	0.74357	1	1	20	76	8
72	0.74353	1	1	20	75	1
73	0.74353	1	1	20	75	2
74	0.74353	1	1	20	75	4
75	0.74353	1	1	20	75	6
95	0.74346	1	1	20	78	10
76	0.74342	1	1	20	75	8
94	0.74341	1	1	20	78	8
78	0.74332	1	1	20	76	1

Calibración de predicción (Forecasting)

run	year	index	sng	sdg	og	rt	pop	edges	clusters	cl_size	Diff	Sprd	Brd	Slp	RG	%urban	grw_rate	Leesalee	grw_pix
0	1990	1	7.08	0.07	2023.66	2.62	138511.21	34339.25	2621.66	52.34	1.09	21.78	1.09	63.94	11.11	15.82	1.47	0.77	2033.42
0	2001	2	8.01	0.13	2489.15	3.18	163774.29	36147.67	2440.38	66.61	1.22	24.30	1.22	45.74	12.93	17.47	1.53	0.75	2500.47
0	2008	3	8.85	0.19	2799.22	3.21	182336.56	36399.61	2361.53	76.71	1.30	26.06	1.30	33.16	14.18	18.67	1.54	0.71	2811.46

Coeficientes: Diff -difussion (dispersión); Brd – breed (reproducción); Sprd – spread (propagación); Slp – slope (resistencia-pendiente); RG - road-gravity (caminos-gravedad).

ANEXO 4

Coefficientes obtenidos de la calibración bruta (Coarse), fina (Fine), final (Final) y de predicción (Forecasting) del E2. Primeras 10 corridas con los valores más altos en el índice Lee-Salle (Leesalee).

Calibración bruta (Coarse)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
45	0,73553	1	1	25	100	1
47	0,73524	1	1	25	100	50
48	0,73524	1	1	25	100	75
49	0,73524	1	1	25	100	100
40	0,73512	1	1	25	75	1
46	0,73502	1	1	25	100	25
42	0,73463	1	1	25	75	50
43	0,73463	1	1	25	75	75
44	0,73463	1	1	25	75	100
41	0,73413	1	1	25	75	25

Calibración fina (Fine)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
153	0,74003	1	1	20	80	45
154	0,74003	1	1	20	80	60
155	0,74003	1	1	20	80	75
158	0,73968	1	1	20	85	30
152	0,73966	1	1	20	80	30
159	0,73964	1	1	20	85	45
160	0,73964	1	1	20	85	60
161	0,73964	1	1	20	85	75
144	0,73962	1	1	20	75	1
156	0,73957	1	1	20	85	1

Coefficientes: Diff -difussion (dispersión); Brd – breed (reproducción); Sprd – spread (propagación); Slp – slope (resistencia-pendiente); RG - road-gravity (camino-gravedad).

Calibración final (Final)

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
72	0,74003	1	1	20	80	45
73	0,74003	1	1	20	80	51
74	0,74003	1	1	20	80	57
75	0,74003	1	1	20	80	63
76	0,74003	1	1	20	80	69
77	0,74003	1	1	20	80	75
300	0,73978	1	2	20	82	45
301	0,73978	1	2	20	82	51
302	0,73978	1	2	20	82	57
303	0,73978	1	2	20	82	63

Calibración de predicción

run	year	index	sng	sdg	og	rt	pop	edges	clusters	cl_size	Diff	Sprd	Brd	Slp	RG	%urban	grw_rate	Leesalee	grw_pix
0	1990	1	7.67	0.18	2021.82	2.93	138460.02	34511.50	2685.61	51.08	1.09	21.77	1.09	71.19	45.88	12.65	1.47	0.77	2032.61
0	2001	2	8.84	0.12	2489.67	3.25	163717.35	36704.00	2543.38	63.90	1.21	24.29	1.21	56.64	47.34	13.96	1.53	0.75	2501.89
0	2008	3	9.45	0.28	2790.36	3.06	182317.90	37200.43	2496.68	72.55	1.30	26.04	1.30	46.58	48.34	14.93	1.54	0.70	2803.14

Coeficientes: Diff -difussion (dispersión); Brd – breed (reproducción); Sprd – spread (propagación); Slp – slope (resistencia-pendiente); RG - road-gravity (caminos-gravedad).

ANEXO 5

Coefficientes extraídos de la calibración bruta para utilizarlos en la fina

Escenario 1

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	0-25	De 5 en 5
Reproducción (Brd)	0-25	De 5 en 5
Propagación (Sprd)	0-25	De 5 en 5
Resistencia-pendiente (Slp)	75-100	De 5 en 5
Caminos-gravedad (RG)	0-25	De 5 en 5

Escenario 2

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	0-25	De 5 en 5
Reproducción (Brd)	0-25	De 5 en 5
Propagación (Sprd)	0-25	De 5 en 5
Resistencia-pendiente (Slp)	75-100	De 5 en 5
Caminos-gravedad (RG)	0-75	De 15 en 15

ANEXO 6

Coefficientes extraídos de la calibración fina para correr la final.

Escenario 1

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	1-5	De 1 en 1
Reproducción (Brd)	1-5	De 1 en 1
Propagación (Sprd)	18-23	De 1 en 1
Resistencia-pendiente (Slp)	75-80	De 1 en 1
Caminos-gravedad (RG)	0-10	De 2 en 2

Escenario 2

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	1-5	De 1 en 1
Reproducción (Brd)	1-5	De 1 en 1
Propagación (Sprd)	18-23	De 1 en 1
Resistencia-pendiente (Slp)	80-85	De 1 en 1
Caminos-gravedad (RG)	45-75	De 6 en 6

ANEXO 7

Coefficientes extraídos de la calibración Final para utilizarlos en la de Predicción

Escenario 1

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	1-1	De 1
Reproducción (Brd)	1-1	De 1
Propagación (Sprd)	20-20	De 1
Resistencia-pendiente (Slp)	75-75	De 1
Caminos-gravedad (RG)	10-10	De 1

Escenario 2

Tipo de Coeficiente	Rango de valores	Pasos
Difusión (Diff)	1-1	De 1
Reproducción (Brd)	1-1	De 1
Propagación (Sprd)	20-20	De 1
Resistencia-pendiente (Slp)	80-80	De 1
Caminos-gravedad(RG)	45-45	De 1

ANEXO 8

Coefficientes usados para la predicción.

Escenario 1

Tipo de Coeficiente	Valor
Difusión (Diff)	1
Reproducción (Brd)	1
Propagación (Sprd)	26
Resistencia-pendiente (Slp)	33
Caminos-gravedad (RG)	14

Escenario 2

Tipo de Coeficiente	Valor
Difusión (Diff)	1
Reproducción (Brd)	1
Propagación (Sprd)	26
Resistencia-pendiente (Slp)	47
Caminos-gravedad(RG)	48

ANEXO 9

Superficie de los asentamientos humanos para las delegaciones del Distrito Federal en el periodo 1985-2008

Delegación	Superficie de la delegación km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Álvaro Obregón	95.892	39.464	41.15	53.719	56.02	54.763	57.11	57.361	59.82	14.255	1.044	2.598
Azcapotzalco	33.593	32.146	95.69	32.947	98.08	33.328	99.21	33.342	99.25	0.801	0.381	0.014
Benito Juárez	26.531	26.202	98.76	26.531	100	26.531	100	26.531	100	0.329	0.000	0.000
Coyoacán	53.925	52.975	98.24	53.925	100	53.925	100	53.925	100	0.950	0.000	0.000
Cuajimalpa de Morelos	62.899	8.785	13.97	16.491	26.22	17.894	28.45	21.468	34.13	7.705	1.403	3.574
Cuauhtemoc	32.547	31.566	96.99	32.547	100	32.547	100	32.547	100	0.981	0.000	0.000
Gustavo A. Madero	87.901	72.823	82.85	75.963	86.42	76.197	86.69	76.412	86.93	3.140	0.234	0.215
Iztacalco	23.238	23.238	100	23.238	100	23.238	100	23.238	100	0.000	0.000	0.000
Iztapalapa	113.652	83.383	73.37	103.692	91.24	104.838	92.25	105.149	92.52	20.310	1.146	0.311
La Magdalena Contreras	63.573	13.421	21.11	15.183	23.88	15.701	24.70	16.242	25.55	1.763	0.517	0.541
Miguel Hidalgo	46.170	36.841	79.79	46.169	100	46.169	100	46.170	100	9.328	0.000	0.001
Milpa Alta	187.894	6.929	3.69	11.898	6.33	12.078	6.43	14.034	7.47	4.969	0.179	1.957
Tláhuac	86.381	18.403	21.30	25.769	29.83	27.337	31.65	28.149	32.59	7.366	1.567	0.813
Tlalpan	224.493	47.031	20.95	62.779	27.96	63.902	28.47	65.884	29.35	15.748	1.123	1.982
Venustiano Carranza	33.769	32.758	97.01	33.683	99.74	33.683	99.74	33.711	99.83	0.925	0.000	0.029
Xochimilco	119.158	21.977	18.44	36.224	30.40	38.829	32.59	40.670	34.13	14.247	2.605	1.841

ANEXO 10

Superficie de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH para las delegaciones el Distrito Federal en el periodo 2008-2035

Delegación	Superficie total km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020 km ²	%	2035 km ²	%	2020 km ²	%	2035 km ²	%
Álvaro Obregón	95.89	59.93	62.49	66.84	69.70	58.89	61.41	66.50	69.35
Azcapotzalco	33.59	33.46	99.60	33.57	99.94	33.44	99.55	33.57	99.94
Benito Juárez	26.53	26.53	100	26.53	100	26.53	100	26.53	100
Coyoacán	53.92	53.92	100	53.92	100	53.92	100	53.92	100
Cuajimalpa de Morelos	62.90	21.82	34.690	25.57	40.65	21.52	34.22	25.83	41.07
Cuauhtemoc	32.55	32.55	100	32.55	100	32.55	100	32.55	100
Gustavo A. Madero	87.90	76.63	87.17	76.78	87.35	76.63	87.18	77.03	87.64
Iztacalco	23.24	23.24	100	23.24	100	23.24	100	23.24	100
Iztapalapa	113.65	105.79	93.08	107.26	94.38	105.74	93.04	109	95.91
La Magdalena Contreras	63.57	16.49	25.94	17.20	27.06	16.40	25.80	17.29	27.20
Miguel Hidalgo	46.17	46.17	100	46.17	100	46.17	100	46.17	100
Milpa Alta	187.89	15.03	8.00	18.97	10.10	15.00	7.99	25.93	13.80
Tláhuac	86.38	30.24	35.01	33.38	38.64	31.00	35.89	43.82	50.73
Tlalpan	224.49	67.02	29.85	71.76	31.97	66.45	29.60	79.14	35.25
Venustiano Carranza	33.77	33.77	100	33.77	100	33.77	100	33.77	100
Xochimilco	119.16	42.48	35.65	48.38	40.60	43.11	36.18	58.34	48.96

E1: escenario 1; E2: escenario 2

ANEXO 11

Superficie de los asentamientos humanos para los municipios del Estado de México en el periodo 1985-2008

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Acolman**	81.65	6.70	8.2	11.23	13.7	13.09	16.0	15.19	18.6	4.52	1.86	2.10
Amecameca***	144.90	4.59	3.2	6.56	4.5	6.62	4.6	6.89	4.8	1.97	0.06	0.28
Atenco**	136.19	2.58	1.9	6.75	5.0	7.26	5.3	7.99	5.9	4.17	0.51	0.72
Atizapan de Zaragoza*	83.82	25.43	30.3	45.08	53.8	45.63	54.4	48.25	57.6	19.64	0.55	2.63
Atlautla***	24.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Axapusco**	195.86	4.70	2.4	6.53	3.3	7.32	3.7	7.82	4.0	1.83	0.78	0.50
Ayapango***	31.71	0.74	2.3	1.14	3.6	1.14	3.6	1.35	4.3	0.40	0	0.21
Chalco*	214.30	12.27	5.7	24.49	11.4	27.12	12.7	34.44	16.1	12.22	2.63	7.32
Chiautla**	23.48	2.57	10.9	5.23	22.3	5.90	25.1	6.52	27.8	2.66	0.68	0.62
Chicoloapan*	33.50	5.60	16.7	7.24	21.6	7.91	23.6	12.55	37.5	1.64	0.67	4.64
Chiconcuac**	4.99	1.80	36.1	3.83	76.7	4.13	82.6	4.29	85.9	2.03	0.30	0.16
Chimalhuacan*	56.13	15.72	28.0	32.71	58.3	34.69	61.8	46.73	83.3	16.98	1.99	12.03
Coacalco de Berriozabal*	37.99	12.94	34.1	16.29	42.9	22.04	58.0	22.76	59.9	3.35	5.75	0.72
Cocotitlan**	27.33	0.93	3.4	1.61	5.9	1.61	5.9	2.34	8.6	0.67	0	0.73
Coyotepec**	49.88	2.82	5.7	5.20	10.4	6.35	12.7	7.21	14.5	2.37	1.15	0.86
Cuautitlan Izcalli*	111.49	37.15	33.3	54.73	49.1	58.33	52.3	68.68	61.6	17.58	3.60	10.35
Cuautitlan*	27.19	7.62	28.0	11.56	42.5	13.27	48.8	15.24	56.0	3.94	1.71	1.97
Ecatepec de Morelos*	158.08	77.42	49.0	105.16	66.5	113.47	71.8	118.07	74.7	27.74	8.30	4.61
Huehuetoca***	76.32	2.50	3.3	5.46	7.2	6.80	8.9	10.64	13.9	2.96	1.34	3.84
Hueyoxtla***	75.85	3.10	4.1	4.12	5.4	4.50	5.9	4.72	6.2	1.02	0.38	0.23
Huixquilucan*	134.96	9.55	7.1	17.50	13.0	19.00	14.1	23.37	17.3	7.96	1.50	4.37
Isidro Fabela***	69.46		0.0	0.07	0.1	0.07	0.1	0.13	0.2	0	0	0.06
Ixtapaluca*	236.11	11.84	5.0	21.75	9.2	29.48	12.5	40.40	17.1	9.90	7.74	10.92
Jaltenco**	3.86	2.82	73.0	3.40	87.9	3.40	87.9	3.41	88.3	0.58	0	0.01
Jaltenco**	12.01	0.76	6.3	0.97	8.1	1.23	10.2	1.67	13.9	0.21	0.26	0.45

Continúa en la siguiente página

Continuación del Anexo 11

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Jilotzingo***	116.32	0.01	0	0.42	0.4	0.44	0.4	0.68	0.6	0.41	0.02	0.24
Jiquipilco	0.70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juchitepec***	67.46	0.63	0.9	0.71	1.1	0.71	1.1	0.71	1.1	0.08	0	0
La Paz*	34.19	9.85	28.8	18.10	52.9	20.15	58.9	22.47	65.7	8.25	2.05	2.32
Lerma	0.63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Melchor Ocampo**	19.62	3.42	17.4	5.42	27.6	5.55	28.3	7.33	37.4	2.00	0.14	1.78
Naucalpan de Juarez*	149.44	48.13	32.2	61.19	40.9	62.38	41.7	67.68	45.3	13.06	1.18	5.31
Nextlalpan**	67.96	4.96	7.3	7.11	10.5	7.76	11.4	8.73	12.9	2.15	0.64	0.98
Nezahualcoyotl*	69.56	47.88	68.8	51.23	73.6	51.23	73.6	51.29	73.7	3.35	0	0.06
Nicolas Romero*	181.93	14.94	8.2	24.48	13.5	26.16	14.4	30.98	17.0	9.54	1.67	4.82
Nopaltepec**	82.17	3.59	4.4	4.38	5.3	4.42	5.4	4.58	5.6	0.79	0.03	0.16
Ocoyoacac	1.56	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0
Otumba**	198.30	5.48	2.8	8.39	4.2	9.20	4.6	9.66	4.9	2.91	0.81	0.46
Otzolotepec	5.629	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Papalotla**	3.63	0.26	7.3	0.50	13.9	0.57	15.7	0.65	17.8	0.24	0.07	0.08
San Martin de las Piramides**	73.99	1.89	2.6	2.20	3.0	2.63	3.5	3.21	4.3	0.31	0.43	0.58
Tecamac*	151.60	17.02	11.2	22.03	14.5	27.54	18.2	42.22	27.9	5.00	5.52	14.68
Temamatla**	18.26	0.92	5.0	1.53	8.4	1.53	8.4	1.94	10.6	0.61	0	0.41
Temascalapa**	196.15	5.26	2.7	6.65	3.4	7.51	3.8	8.51	4.3	1.39	0.85	1.00
Temoaya	3.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tenango del Aire***	57.72	1.24	2.2	1.81	3.1	1.85	3.2	1.98	3.4	0.57	0.04	0.12
Teoloyucan**	45.47	5.59	12.3	10.90	24.0	11.85	26.1	13.67	30.1	5.31	0.95	1.82
Teotihuacan**	76.07	5.26	6.9	8.19	10.8	10.54	13.9	11.58	15.2	2.93	2.34	1.04
Tepetlaoxtoc**	147.99	4.51	3.0	9.34	6.3	10.08	6.8	10.45	7.1	4.83	0.74	0.38
Tepotzotlan**	120.48	5.59	4.6	10.54	8.7	11.53	9.6	12.19	10.1	4.95	0.99	0.66
Tequixquiac***	20.94	0.31	1.5	0.63	3.0	0.84	4.0	0.93	4.4	0.32	0.21	0.08
Texcoco**	362.08	17.66	4.9	29.54	8.2	32.09	8.9	38.12	10.5	11.88	2.54	6.04

Continúa en la siguiente página

Continuación del Anexo 11

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Tezoyuca**	12.81	1.61	12.6	2.80	21.9	3.17	24.8	3.93	30.7	1.19	0.37	0.76
Tlalmanalco***	124.41	3.14	2.5	4.83	3.9	4.83	3.9	5.77	4.6	1.69	0	0.94
Tlalnepantla de Baz*	53.95	44.37	82.2	48.25	89.4	48.45	89.8	48.58	90.1	3.88	0.20	0.13
Tlalnepantla de Baz*	20.05	9.28	46.3	12.23	61.0	12.89	64.3	13.36	66.6	2.95	0.66	0.46
Tultepec**	28.07	6.63	23.6	11.70	41.7	12.79	45.6	15.12	53.9	5.07	1.08	2.33
Tultitlan*	12.60	4.89	38.8	8.15	64.7	9.23	73.3	10.67	84.7	3.26	1.08	1.44
Tultitlan**	52.30	16.33	31.2	26.43	50.5	28.31	54.1	30.43	58.2	10.10	1.88	2.12
Valle de Chalco Solidaridad**	49.30	17.95	36.4	22.81	46.3	23.16	47.0	25.96	52.7	4.86	0.35	2.80
Xalatlaco	5.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Xonacatlan	9.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zumpango**	202.13	11.35	5.6	20.64	10.2	22.10	10.9	28.64	14.2	9.28	1.46	6.54

* Municipios que se integraron a la ZMCM en 1980.

** Municipios conurbados que se integraron a la ZMCM en 1990 (Villarreal y Aguirre, 2003)

*** Municipios conurbados que se integraron a la ZMCM en 2007 (INEGI, 2007)

Los municipios que aparecen sin señal pertenecen a la Cuenca de México pero no a la ZMCM.

ANEXO 12

Superficie de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH para los municipios del Estado de México en el periodo 2008-2035

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020 km ²	%	2035 km ²	%	2020 km ²	%	2035 km ²	%
Acolman	81.65	18.88	23.13	31.33	38.37	18.37	22.50	30.63	37.52
Amecameca	144.90	7.67	5.29	13.23	9.13	7.65	5.28	12.88	8.89
Atenco	136.19	9.44	6.93	17.01	12.49	9.46	6.95	17.53	12.87
Atizapán de Zaragoza	83.82	49.68	59.27	61.24	73.05	48.88	58.31	58.25	69.49
Atlautla	24.65	0	0	0	0	0	0	0	0
Axapusco	195.86	8.74	4.46	19.58	10	8.38	4.28	18.23	9.31
Ayapango	31.71	1.58	4.97	4.01	12.66	1.47	4.65	3.68	11.60
Chalco	214.30	39.47	18.42	63.95	29.84	38.45	17.94	63.48	29.62
Chiautla	23.48	7.80	33.23	13.87	59.05	7.65	32.58	13.91	59.21
Chicoloapan	33.50	13.34	39.81	16.31	48.69	13.19	39.38	16.14	48.19
Chiconcuac	4.99	4.56	91.26	4.99	100	4.56	91.42	4.99	100
Chimalhuacán	56.13	47.78	85.13	50.70	90.33	47.48	84.59	51.51	91.78
Coacalco de Berriozabal	37.99	23.50	61.84	24.32	64.02	23.52	61.90	24.91	65.57
Cocotitlán	27.33	2.78	10.19	7.08	25.90	2.62	9.60	6.68	24.42
Coyotepec	49.88	8.53	17.11	13.66	27.39	8.21	16.46	13.42	26.90
Cuautitlán	27.19	17.63	64.84	23.08	84.87	17.39	63.96	23.00	84.59
Cuautitlán Izcalli	111.49	73.89	66.27	91.72	82.27	72.78	65.28	91.47	82.04
Ecatepec de Morelos	158.08	121.49	76.86	127.40	80.59	121.04	76.57	128.11	81.04
Huehuetoca	76.32	13.83	18.12	28.28	37.06	13.10	17.16	27.02	35.41
Hueyoxtlá	75.85	5.27	6.94	9.41	12.40	5.14	6.78	8.97	11.83
Huixquilucan	134.96	24.15	17.89	34.66	25.68	23.62	17.50	31.96	23.68
Isidro Fabela	69.46	0.14	0.21	0.56	0.81	0.13	0.19	0.44	0.64
Ixtapaluca	236.11	43.16	18.28	54.08	22.91	42.42	17.97	54.47	23.07
Jaltenco	3.86	3.55	91.87	3.86	100	3.52	91.24	3.86	99.88
Jaltenco	12.01	1.99	16.58	4.70	39.12	1.99	16.53	4.57	38.02
Jilotzingo	116.32	0.82	0.70	1.87	1.60	0.68	0.59	1.63	1.40

Continúa en la siguiente página

Continuación del Anexo 12

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020		2035		2020		2035	
km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
Jilotzingo	116.32	0.82	0.70	1.87	1.60	0.68	0.59	1.63	1.40
Jiquipilco	0.70	0	0	0	0	0	0	0	0
Juchitepec	67.46	0.71	1.06	1.10	1.63	0.71	1.06	1.82	2.70
La Paz	34.19	23.60	69.04	25.92	75.81	23.29	68.12	26.06	76.22
Lerma	0.63	0	0	0	0	0	0	0	0
Melchor Ocampo	19.62	8.49	43.29	14.64	74.62	8.22	41.88	14.23	72.53
Naucalpan de Juárez	149.44	69.53	46.52	78.73	52.69	69.01	46.18	77.81	52.07
Nextlalpan	67.96	9.79	14.40	18.05	26.56	9.59	14.11	17.71	26.06
Nezahualcoyotl	69.56	52.05	74.83	55.18	79.32	51.87	74.57	55.03	79.10
Nicolás Romero	181.93	34.45	18.94	47.81	26.28	33.23	18.27	46.63	25.63
Nopaltepec	82.17	5.04	6.13	9.57	11.64	4.87	5.93	9.09	11.07
Ocoyoacac	1.56	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.15
Otumba	198.30	11.34	5.72	22.34	11.27	10.88	5.49	20.86	10.52
Otzolotepec	5.63	0	0	0	0	0	0	0	0
Papalotla	3.63	0.87	23.88	2.16	59.40	0.84	23.02	2.04	56.22
San Martín de las Pirámides	73.99	3.51	4.74	7.57	10.23	3.52	4.76	7.11	9.60
Tecamac	151.60	49.45	32.62	77.74	51.28	48.79	32.18	76.94	50.75
Temamatla	18.26	2.27	12.42	5.84	31.99	2.26	12.40	5.56	30.44
Temascalapa	196.15	9.88	5.04	21.29	10.85	9.55	4.87	20.69	10.55
Temoaya	3.35	0	0	0	0	0	0	0	0
Tenango del Aire	57.72	2.42	4.18	4.81	8.32	2.31	3.99	4.53	7.85
Teoloyucan	45.47	16.47	36.22	26.83	59.01	16.14	35.51	26.66	58.64
Teotihuacan	76.07	13.76	18.10	26.68	35.07	13.34	17.54	25.40	33.39
Tepetlaoxtoc	147.99	11.47	7.75	18.59	12.56	11.04	7.46	18.32	12.38
Tepotztlán	120.48	14.25	11.82	25.82	21.43	13.82	11.47	25.09	20.82
Tequixquiac	20.94	1.06	5.04	2.75	13.16	1.00	4.78	2.38	11.35
Texcoco	362.08	44.87	12.39	79.46	21.95	43.75	12.08	80.26	22.17

Continúa en la siguiente página

Continuación del Anexo 12

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020		2035		2020		2035	
km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
Tezoyuca	12.81	4.92	38.42	9.30	72.62	4.70	36.73	9.10	71.04
Tlalmanalco	124.41	6.33	5.09	12.56	10.10	6.18	4.97	11.41	9.17
Tlalnepantla de Baz	53.95	48.64	90.16	49.26	91.31	48.60	90.09	49.15	91.11
Tlalnepantla de Baz	20.05	13.54	67.57	13.87	69.19	13.55	67.58	14.82	73.91
Tultepec	28.07	16.96	60.43	24.72	88.08	16.64	59.29	24.55	87.45
Tultitlán	12.60	11.55	91.70	12.42	98.56	11.47	91.05	12.40	98.46
Tultitlán	52.30	32.18	61.53	36.82	70.40	32.12	61.41	37.50	71.70
Valle de Chalco Solidaridad	49.30	27.12	55.01	33.06	67.05	26.81	54.38	32.65	66.21
Xalatlaco	5.59	0	0	0	0	0	0	0	0
Xonacatlán	9.64	0	0	0	0	0	0	0	0
Zumpango	202.13	33.48	16.56	65.35	32.33	32.36	16.01	63.61	31.47

E1: escenario 1; E2: escenario 2

ANEXO 13

Superficie de los asentamientos humanos para los municipios de Hidalgo en el periodo 1985-2008

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Almoloya	243.00	1.41	0.6	2.497	1.0	2.780	1.1	2.966	1.2	1.09	0.28	0.19
Apan	327.70	3.81	1.2	6.253	1.9	7.026	2.1	7.341	2.2	2.44	0.77	0.31
Atotonilco de Tula	2.48	1.67	67.3	1.725	69.6	1.725	69.6	1.740	70.2	0.06	0	0.01
Cuautepec de Hinojosa	113.00	0.18	0.2	0.408	0.4	0.443	0.4	0.491	0.4	0.22	0.04	0.05
Emiliano Zapata	125.17	1.94	1.5	2.275	1.8	2.552	2.0	2.645	2.1	0.34	0.28	0.09
Epazoyucan	133.01	1.68	1.3	2.113	1.6	2.474	1.9	3.328	2.5	0.43	0.36	0.85
Mineral de la Reforma	108.97	2.44	2.2	7.411	6.8	8.651	7.9	16.456	15.1	4.97	1.24	7.81
Mineral del Chico	3.94	0	0	0	0	0	0	0.277	7.0	0	0	0.28
Mineral del Monte	21.92	0.70	3.2	0.96	4.4	1.12	5.1	1.19	5.4	0.27	0.16	0.07
Pachuca de Soto	139.30	11.03	7.9	32.79	23.5	37.87	27.2	44.85	32.2	21.76	5.08	6.98
San Agustín Tlaxiaca	15.89	0	0.0	0.116	0.7	0.116	0.7	0.426	2.7	0.12	0	0.31
Singuilucan	268.77	1.11	0.4	1.46	0.5	1.53	0.6	1.61	0.6	0.34	0.07	0.08
Tepeapulco	244.62	3.19	1.3	6.61	2.7	7.76	3.2	9.91	4.1	3.42	1.14	2.16
Tepeji del Río de Ocampo	12.59	0	0	0	0	0	0	0.375	3.0	0	0	0.37
Tizayuca*	77.35	7.64	9.9	11.47	14.8	12.92	16.7	20.18	26.1	3.84	1.45	7.26
Tlanalapa	86.65	0.82	0.9	1.64	1.9	1.96	2.3	2.15	2.5	0.82	0.32	0.19
Tolcayuca	102.03	1.91	1.9	3.03	3.0	3.16	3.1	3.78	3.7	1.12	0.13	0.62
Villa de Tezontepec	99.27	1.34	1.4	2.05	2.1	2.05	2.1	2.30	2.3	0.71	0	0.25
Zapotlán de Juárez	115.89	4.67	4.0	7.04	6.1	7.24	6.2	7.99	6.9	2.37	0.20	0.75
Zempoala	317.35	7.26	2.3	10.20	3.2	11.27	3.5	14.38	4.5	2.94	1.06	3.11

* Municipio conurbado que se integró a la ZMCM en 1990.

ANEXO 14

Superficie de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados CON SLEUTH para los municipios de Hidalgo en el periodo 2008-2035.

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020 km ²	%	2035 km ²	%	2020 km ²	%	2035 km ²	%
Almoloya	243	3.39	1.40	9.01	3.71	3.24	1.33	8.44	3.47
Apan	327.70	8.13	2.48	17.94	5.47	7.89	2.41	17.23	5.26
Atotonilco de Tula	2.48	1.75	70.75	1.94	78.33	1.75	70.48	2.00	80.50
Cuautepec de Hinojosa	113.00	0.49	0.43	1.87	1.65	0.51	0.45	1.77	1.57
Emiliano Zapata	125.17	2.87	2.29	6.58	5.26	2.84	2.27	6.06	4.84
Epazoyucan	133.01	3.76	2.82	10.00	7.52	3.59	2.70	9.59	7.21
Mineral de la Reforma	108.97	19.34	17.75	37.79	34.68	18.63	17.09	36.51	33.51
Mineral del Chico	3.94	0.28	7.15	0.28	7.15	0.28	7.15	0.42	10.72
Mineral del Monte	21.92	1.20	5.46	1.46	6.67	1.20	5.46	1.85	8.44
Pachuca de Soto	139.30	49.41	35.47	65.00	46.66	48.74	34.99	66.16	47.50
San Agustín Tlaxiaca	15.89	0.47	2.95	1.08	6.78	0.51	3.18	1.30	8.19
Singuilucan	268.77	1.77	0.66	3.56	1.32	1.72	0.64	3.83	1.43
Tepeapulco	244.62	11.48	4.69	20.35	8.32	11.16	4.56	20	8.18
Tepeji del Río de Ocampo	12.59	0.48	3.82	1.69	13.41	0.40	3.19	1.58	12.56
Tizayuca	77.35	24.58	31.78	43.12	55.75	24.21	31.30	42.39	54.80
Tlanalapa	86.65	2.40	2.78	5.72	6.60	2.37	2.74	5.36	6.18
Tolcayuca	102.03	4.20	4.12	9.14	8.96	4.06	3.98	8.87	8.69
Villa de Tezontepec	99.27	2.84	2.86	6.30	6.34	2.71	2.73	6.08	6.12
Zapotlán de Juárez	115.89	8.86	7.64	14.93	12.89	8.58	7.41	14.63	12.63
Zempoala	317.35	16.37	5.16	36.49	11.50	15.77	4.97	34.67	10.92

E1: escenario 1; E2: escenario 2

ANEXO 15

Superficie de los asentamientos humanos para los municipios de Tlaxcala en el periodo 1985-2008

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Benito Juárez	23.283	0.428	1.84	0.623	2.68	0.729	3.13	0.748	3.21	0.20	0.11	0.02
Calpulalpan	255.275	2.462	0.96	4.788	1.88	5.191	2.03	5.399	2.11	2.33	0.40	0.21
Españita	4.287	0.048	1.11	0.127	2.97	0.127	2.97	0.142	3.32	0.08	0	0.02
Hueyotlipan	107.935	0.885	0.82	1.585	1.47	1.923	1.78	2.011	1.86	0.70	0.34	0.09
Muñoz de Domingo Arenas	1.464	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nanacamilpa de Mariano Arista	109.331	1.845	1.69	2.302	2.11	2.323	2.12	2.410	2.20	0.46	0.02	0.09
Sanctorum de Lázaro Cárdenas	74.607	0.755	1.01	1.296	1.74	1.372	1.84	1.414	1.89	0.54	0.08	0.04
Tlaxco	212.764	1.923	0.90	3.713	1.75	4.284	2.01	4.481	2.11	1.79	0.57	0.20

ANEXO 16

Superficie de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH para los municipios Tlaxcala en el periodo 2008-2035.

Municipio	Superficie total km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020 km ²	%	2035 km ²	%	2020 km ²	%	2035 km ²	%
Benito Juárez	23.28	0.88	3.76	1.62	6.96	0.84	3.59	1.62	6.97
Calpulalpan	255.28	6.01	2.36	11.61	4.55	5.97	2.34	11.06	4.33
Españita	4.29	0.16	3.74	0.48	11.14	0.16	3.66	0.40	9.36
Hueyotlipan	107.93	2.27	2.10	5.87	5.43	2.20	2.04	5.49	5.09
Muñoz de Domingo Arenas	1.46	0	0	0	0	0	0	0	0
Nanacamilpa de Mariano Arista	109.33	2.60	2.38	6.09	5.57	2.53	2.32	5.66	5.18
Sanctorum de Lázaro Cárdenas	74.61	1.61	2.16	3.56	4.78	1.55	2.08	3.24	4.34
Tlaxco	212.76	4.88	2.29	11.86	5.58	4.70	2.21	10.90	5.12

E1: escenario 1; E2: escenario 2

ANEXO 17

Superficie de los asentamientos humanos para los municipios de Puebla en el periodo 1985-2008

Municipio	Superficie del municipio km ²	Superficie que ocupan								Incremento por periodo		
		1985		1995		2001		2008		85-95	95-01	01-08
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²		
Chignahuapan	82.660	0.843	1.02	1.030	1.25	1.199	1.45	1.276	1.54	0.19	0.17	0.08
Tlahuapan	2.463	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

ANEXO 18

Superficie de los asentamientos humanos de los E1 y E2 modelados con SLEUTH para los municipios de Puebla en el periodo 2008-2035.

Municipio	Superficie total km ²	Superficie de los asentamientos							
		E1				E2			
		2020		2035		2020		2035	
km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
Chignahuapan	82.66	1.43	1.73	3.20	3.87	1.34	1.63	2.99	3.62
Tlahuapan	2.463	0	0	0	0	0	0	0	0

E1: escenario 1; E2: escenario 2

ANEXO 19

Tipo y fecha de decreto, estados y municipios que ocupan las Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la Cuenca de México.

ANP	Decreto	Fecha de decreto	Estado	Municipios	Área (ha)
El Chico	Parque Nacional	08-Nov-35	Hidalgo	Mineral del Chico y Pachuca	546.811
Iztaccihuatl-Popocatepetl	Parque Nacional	18-Sep-36	Edo. de México, Puebla y Morelos	Edo. de México: Tlalmanalco, Atlautla, Ecatzingo y Amecameca. Puebla: Huejotzingo, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco. Morelos: Tetela del Volcán.	34397.402
Molino de Flores Netzahualcoyotl	Parque Nacional	23-Sep-36	Edo. de México	Texcoco	45.663
El Tepeyac	Parque Nacional	28-Sep-36	Distrito Federal	Gustavo A. Madero	8.644
Los Remedios	Parque Nacional	22-Ene-37	Edo. de México	Naucalpan de Juárez	468.070
Histórico de Coyoacán	Parque Nacional	18-Feb-37	Distrito Federal	Coyoacán	39.769
Cerro de la Estrella	Parque Nacional	05-Nov-37	Distrito Federal	Iztapalapa	1183.28
Desierto de los Leones	Parque Nacional	15-Abr-38	Distrito Federal	Cuajimalpa y Álvaro Obregón	1961.257
Insur. Miguel Hidalgo y Costilla	Parque Nacional	22-Abr-38	Edo. De México y Distrito Federal	Edo. de México: Ocoyoacac y Huixquilucan. D. F.: Cuajimalpa	331.337
Lomas de Padierna	Parque Nacional	24-Ago-38	Distrito Federal	Magdalena Contreras y Álvaro Obregón	8.652
Fuentes Brotantes de Tlalpan	Parque Nacional	26-Sep-38	Distrito Federal	Tlalpan	8.655
Cumbres del Ajusco	Parque Nacional	29-Ago-39	Distrito Federal	Tlalpan	301.381
Sacromonte	Parque Nacional	06-Jul-82	Edo. de México	Amecameca	43.734

