

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA SIERRA DEL AJUSCO Y
MODELADO DE ESCENARIOS DE CRECIMIENTO URBANO**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS E INGENIERÍA AMBIENTALES

Presenta:

BIOL. SARAI VÁZQUEZ GONZÁLEZ

Asesora:

DRA. ALICIA CHACALO HILU

Co- Asesor:

DR. ARMANDO CORTÉS ORTIZ

Quiero dedicar este trabajo y logro a mi abuela Concha+
Por enseñarme a luchar con todas mis fuerzas hasta el final
Por hacerme ver que la vida siempre nos ofrece cosas maravillosas
Que hay que saber disfrutar y compartir con la gente que más amamos
Que nosotros decidimos nuestro destino

**¿Solo así he de irme?
¿Cómo las flores que perecieron?
¿Nada queda en mi nombre?
¿Nada de mí legado aquí en la tierra?
¡Al menos flores, al menos cantos!**

Nezahualcoyotl

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos otorgados para la realización de este trabajo y de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco por los recursos humanos y materiales brindados durante mi estancia en esta casa de estudios.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango (CIIDIR) del Instituto Politécnico Nacional, por todo el apoyo brindado durante la ejecución del presente proyecto, así como en mi formación académica.

A la Universidad de Costa Rica (UCR), especialmente al Programa de la Maestría en Desarrollo Sostenible por los conocimientos y experiencias compartidas que me hicieron crecer profesionalmente.

A la Dra. Violeta Mugica Álvarez por todo el apoyo y conocimientos brindados durante mis estudios de posgrado.

A mis asesores Dra. Alicia Chacalo Hilu por siempre apoyarme en llevar a buen término mis proyectos, por creer en mí ayudándome siempre ha seguir hacia adelante, por nunca dejarme sola con mis ideas. Al Dr. Armando Cortes Ortiz por recibirme con los brazos abiertos en Durango y brindarme todo sus conocimientos para realizar un buen proyecto, así como compartir experiencias de vida y siempre recordándome lo maravilloso que vemos el mundo los biólogos.

Al Dr. Adolfo Hernández Moreno por ser un muy buen profesor de SIG, ayudándome a darle rumbo a mis ideas y al final hacerme lucir mi trabajo y motivarme siempre por más.

Al maestro Jaime Grabinsky por compartir conmigo siempre buenos momentos, por ayudarme y motivarme en seguir con mis metas y concluir con mi trabajo, además de enseñarme y recordarme el amor hacia las matemáticas.

A todos mis compañeros de generación de la maestría en la UAM, el CIIDIR y la UCR, por compartir conmigo tantos buenos momentos llenos de diversión y aprendizaje. Por ayudarme con los cursos que se me dificultaban y por compartir conmigo sus puntos de vista.

A todos los profesores que me impartieron cursos a lo largo de esta formación académica, por sus acertados comentarios, por siempre enseñarme algo nuevo y por todas las vivencias.

A mis padres y hermanos que siempre me han enseñado que soy una persona capaz de lograr lo que me proponga, apoyándome siempre con su cariño, conocimiento,

tiempo y fuerza incondicional, lo cual siempre me ha hecho crecer y seguir hacia adelante.

A todas mis amistades, que de una u otra forma siempre me han ayudado en seguir adelante, levantándome y dándome buenos consejos para superar las adversidades y aprender de mis errores, además de hacerme sentir querida y apoyada.

A mis familias adoptivas, en Costa Rica y Durango que me recibieron con los brazos abiertos y me hicieron pasar unas extraordinarias aventuras. Haciéndome sentir como en casa.

A mi pareja de vida que siempre me ha apoyado en concluir con mis proyectos y me motiva a dar lo mejor de mí, aparte de escucharme y apoyarme.

A todas las personas que influyeron en la realización de mis estudios de posgrado, ya sea con conocimientos, retos, palabras, cariño, consejos, recursos o con su simple presencia en mi vida.

CONTENIDO

Símbolos y abreviaturas	1
Resumen	1
Abstract	1
CAPITULO I	
I.1. Introducción	3
I.2. Estado del arte y Antecedentes	6
I.2.1. Crecimiento urbano	6
I.2.2. Marco histórico urbano de la Ciudad de México y zona conurbada	8
I.2.3. Marco normativo referente al crecimiento urbano	10
I.2.3.1. Planes de ordenamiento ecológico y territorial POEGT, POZMVM, POETEM y PGOEDF	15
I.2.4. Zonas restrictivas para el desarrollo urbano	18
I.2.4.1. Áreas Naturales Protegidas (ANP)	18
I.2.4.2. Otras áreas	25
I.2.5. Uso y cobertura del suelo	25
I.2.5.1. Cartas de uso del suelo y Vegetación	26
I.2.6. Sistemas de información geográfica	28
I.2.6.1. Módulos utilizados para modelar el crecimiento urbano	30
I.2.7. Modelos de simulación de escenarios de crecimiento urbano	31
I.2.7.1. Regresión logística (RL)	31
I.2.7.2. Cadenas de Markov	35
I.2.7.3. Autómatas celulares (CA)	37
I.2.7.4. Análisis Multicriterio (EMC)	40
I.2.8. Trabajos en la zona de estudio	45
CAPITULO II	
II.1. Justificación	46
II.2. Objetivos	47
II.2.1. General	47
II.2.2. Objetivos específicos	47
II.3. Hipótesis	47
CAPITULO III	
III.1. Materiales y métodos	48
III.1.1. Software, cartografía y equipo	48
III.1.2. Zona de estudio	51
III.1.2.1. Caracterización del área de estudio	51
III.1.3. Modelo conceptual general	62
III.1.4. Sistemas de información geográfica y generación de información	63
III.1.5. Método para calcular la superficie y evaluar cambios de cobertura y uso de suelo	65
III.1.5.1. Validación en campo	66
III.1.6. Modelado de escenarios de crecimiento urbano	67
III.1.6.1. Modelado con regresión logística	67
III.1.6.2. Modelado con Cadenas de Markov	72
III.1.6.3. Modelado con Autómatas celulares y Markov	73
III.1.6.4. Modelado con análisis multicriterio y elaboración de mapas de aptitud	74

CAPITULO IV

IV.1. Resultados y Discusión	77
IV.1.1. Evaluación de cambios por tipo de cobertura y uso de suelo entre la serie I y la serie V	77
IV.1.2. Crecimiento de la zona urbana de la serie I a la V	96
IV.1.3 Modelo de crecimiento urbano y variables que influyeron	100
IV.1.4. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo	107
IV.1.5. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo de acuerdo a ciertas variables (autómatas celulares y cadenas de Markov)	111
IV.1.6. Aptitud de uso de suelo urbano	115
IV.2. Conclusiones	123
IV.3. Recomendaciones	124
Referencias	126
Anexos	136

Relación de tablas

Tabla 1. Crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México	3
Tabla 2. Población urbana entre 1970 y 2005 de la región Centro – Este que comprende el Distrito Federal, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala.	9
Tabla 3. Normatividad referente al desarrollo urbano y ordenamiento territorial	11
Tabla 4. Ejemplo de matriz de transición que simula las probabilidades de cambio de uso de suelo.	35
Tabla 5. Cambios de superficie entre la serie I y V.	79
Tabla 6. Cambios de superficies por categoría en las diferentes series.	80
Tabla 7. Matriz de cambios de superficie.	80
Tabla 8. Valores de correlación entre los escenarios.	100
Tabla 9. Índice de correlación (ROC).	105
Tabla 10. Superficie que cambio entre la Serie I y III.	107
Tabla 11. Superficie que cambio entre la Serie II y IV.	108
Tabla 12. Índices de correlación de los escenarios.	115
Tabla 13. Peso de las variables consideradas para escenario 1.	115
Tabla 14. Peso de las variables consideradas para escenario 2.	117
Tabla 15. Peso de las variables consideradas para escenario 3.	118
Tabla 16. Peso de las variables consideradas para escenario 4.	119
Tabla 17. Variables del PGOEDF.	120
Tabla 18. Unidades ambientales del PGOEDF.	120

Relación de figuras

Figura 1. Tipos de vecinos de autómata celular.	38
Figura 2. Escala de medida según Saaty.	41
Figura 3. Área de estudio.	51
Figura 4. División política de las delegaciones y municipios.	52
Figura 5. Áreas Naturales Protegidas de la zona de estudio.	53
Figura 6. Modelo de elevación digital tomado de INEGI.	54
Figura 7. Hidrografía de la zona.	55
Figura 8. Tipo de clima.	56
Figura 9. Red vía en la zona.	57
Figura 10. Tipos de rocas y Ubicación de fallas y Volcanes en la zona.	58
Figura 11. Tipos de suelo en la zona.	59
Figura 12. Ubicación de servicios en la zona.	60
Figura 13. Asentamientos irregulares de acuerdo a la PAOT.	61
Figura 14. Riesgos Ambientales en la zona.	62
Figura 15. Mapa conceptual general.	63
Figura 16. Metodología aplicada para la 1° Etapa.	64
Figura 17. Metodología seguida en la 2° etapa.	66
Figura 18. Recorridos en la zona de estudio.	66
Figura 19. Variables consideradas para la RL.	69
Figura 20. Ejemplo de matriz para RL.	70
Figura 21. Metodología de la 3° Etapa con RL.	72
Figura 22. Variables consideradas para CA_MARKOV.	73
Figura 23. Metodología de la 3° Etapa con Markov y CA	74
Figura 24. Restricciones utilizadas en la MCE.	75
Figura 25. Factores utilizados en la MCE.	75
Figura 26. Metodología 4° Etapa.	76
Figura 27. Cambios presentados entre las cinco series de uso de suelo y vegetación.	78
Figura 28. Gráficas comparativas del porcentaje de cubierta vegetal y uso de suelo.	79
Figura 29. Superficie (ha) de acuerdo al tipo de vegetación y uso de suelo entre las diferentes series.	81
Figura 30. Pérdidas y ganancias de superficie por categoría.	81
Figura 31. Polígono clasificado como matorral crasicaule en 2011.	82
Figura 32. Superficie (ha) con uso de suelo como agricultura de temporal.	83
Figura 33. Cambios en la superficie de agricultura de temporal entre la serie I y V.	83
Figura 34. Agricultura de temporal en límite con zona urbana (LN 19° 19.5' LW 99° 17.5' 2800 msnm).	84
Figura 35. Superficie (ha) con uso de suelo como pastizal inducido.	85
Figura 36. Cambios en la superficie de pastizal inducido entre la serie I y V.	85
Figura 37. Pastizal inducido.	86
Figura 38. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de pino-encino.	86
Figura 39. Cambios en la superficie de bosque de pino-encino entre la serie I y V.	87
Figura 40. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de pino.	88
Figura 41. Bosque de pino (LN 19° 13' y LW 99° 16' 3400 msnm).	88
Figura 42. Cambios en la superficie de bosque de pino entre la serie I y V.	89

Figura 43. Límite de bosque de pino y oyamel (LN 19° 16.067' y LW 99° 17.56' 3000 msnm).	89
Figura 44. Plántula de oyamel a la izquierda y de pino a la derecha (coordenadas LN 19°15.85' y LW 99°17.65').	90
Figura 45. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de oyamel.	90
Figura 46. Hojas de oyamel (coordenadas LN 19° 18.68' y LW 99° 18.99').	91
Figura 47. Al fondo bosque de oyamel (coordenadas LN 19° 18.4' y LW 99° 18.71').	91
Figura 48. Cambios en la superficie de bosque de oyamel entre la serie I y V.	92
Figura 49. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de encino-pino	93
Figura 50. Cambios en la superficie de bosque de encino-pino entre la serie I y V.	93
Figura 51. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de encino.	94
Figura 52. Bosque de encino cercano a la zona urbana (LN 19° 40' LW 99° 10.3' 2200 msnm).	94
Figura 53. Cambios en la superficie de bosque de encino entre la serie I y V.	95
Figura 54. Cambios en la superficie de bosque de cultivo y matorral crasicuale.	96
Figura 55. Superficie (ha) con uso de suelo de zona urbana.	97
Figura 56. Polígonos clasificados como zona urbana de acuerdo a las diferentes fuentes.	97
Figura 57. Zona urbana en recorrido 2015 en la zona de estudio.	99
Figura 58. Superficies donde hubo cambio de uso de suelo a zona urbana.	99
Figura 59. Escenarios 1 y 3 construidos en base a la ecuación de regresión logística	101
Figura 60. Escenarios 2 y 4 construidos en base a la ecuación de regresión logística	102
Figura 61. Escenario construido en base a la RL hecha en IDRISI.	106
Figura 62. Escenario 1 construido en base a MARKOV	108
Figura 63. Escenario 2 construido en base a MARKOV.	109
Figura 64. Escenarios pronosticados en base a MARKOV.	110
Figura 65. Escenario 1 construido en base a CA_MARKOV.	112
Figura 66. Escenario 2 construido en base a CA_MARKOV.	113
Figura 67. Escenarios pronosticados en base a CA_MARKOV.	114
Figura 68. Escenario 1 de la aptitud de suelo urbano.	116
Figura 69. Escenario 2 de la aptitud de suelo urbano.	117
Figura 70. Escenario 3 de la aptitud de suelo urbano.	118
Figura 71. Escenario 4 de la aptitud de suelo urbano.	119
Figura 72. Comparación de escenarios.	121

Símbolos y Abreviaturas

AGEB	Áreas geoestadísticas básicas
ANP	Áreas Naturales Protegidas
CA_MARKOV	Células autómatas con cadenas de Markov
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CONABIO	Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad
DF	Distrito Federal
MCE	Análisis multicriterio
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LN	Latitud Norte
LW	Longitud Oeste
MDE	Modelo de elevación digital
PAOT	Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial
PDDU	Programas Delegacionales de Desarrollo Urbano
PGOEDF	Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal
POEGT	Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio
POZMVM	Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle De México
POETEM	Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México
RL	Regresión logística
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
UTM	Universal Transversal de Mercator
USUE	Uso de suelo
ZMVM	Zona metropolitana del Valle de México
ha	hectáreas
msnm	metros sobre el nivel del mar

Resumen

Este trabajo pretende evaluar el cambio de uso de suelo en la Sierra Ajusco y sus alrededores, desde la década de los setentas a la fecha por medio de Sistemas de Información Geográfica, así como modelar los escenarios de crecimiento urbano. Se hizo un análisis de aptitud de crecimiento urbano utilizando cadenas de Markov, autómatas celulares y regresión logística. Se construyeron los mapas de uso de suelo de la zona de interés en base a la información de las series I a la V (INEGI), se evaluaron los cambios de superficie de cada categoría de uso de suelo y vegetación y se realizó una validación en campo de cada una de las categorías. Con los mapas procesados, se desarrollaron los modelos de crecimiento urbano por medio de la técnica de cadenas de Markov y autómatas celulares; el modelo se validó haciendo un pronóstico al año 2011 y comparando los resultados con la serie V. Se elaboró un modelo por medio de regresión logística para conocer cuáles eran las variables significativas que influyen en el crecimiento urbano. Otro modelo se construyó con la técnica de evaluación multicriterio, utilizando la combinación lineal ponderada con el método de Saaty, generando los valores de ponderación. En la zona se identificaron 7 tipos de vegetación: Bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, matorral crasicaule y pastizal inducido; así como, uso de suelo para agricultura de temporal y zona urbana. Entre la serie I y la V, la superficie urbana se incrementó 1.6 veces, sin embargo, de acuerdo a la imagen de satélite (Landsat 8, 2014) la superficie urbana aumentó aproximadamente 3 veces. Cerca de 1,600 ha que tenían una clasificación de uso de pastizal o agricultura cambiaron a uso urbano, lo mismo ocurrió con 1,000 ha de bosque de encino. El modelo construido con las Series II y IV para pronosticar al 2011 por medio de cadenas de Markov, resultó con un valor alto de índice de Kappa (de aprox. 0.9), combinado con autómatas celulares. El valor de similitud fue calculado al comparar las series II y IV con la serie V. Los resultados obtenidos en estos modelos fueron utilizados para realizar el pronóstico de crecimiento a mediano y largo plazo. Los escenarios construidos en base a la teoría de cadenas de Markov y autómatas celulares no simularon algún cambio en el crecimiento de la zona urbana, sin embargo, se considera que existen variables impredecibles (como intereses políticos, costo de terreno, lucha de clases, etc.) que pudieron influir en el crecimiento.

Se simuló el crecimiento urbano de acuerdo a las características históricas con lo que se determinó el crecimiento de la zona urbana, utilizando las técnicas de cadenas de Markov y de autómatas celulares.

Abstract

This work aims to evaluate the change of land use in the Sierra Ajusco and its surroundings since the 1970's to date through geographic information systems, and to model scenarios of urban growth. The study area was delimited according to the coords of the area used by Benitez

et al. in 1987. Maps of land use of the area were developed based on the information from the series I to V (INEGI), we assessed the changes in surface of each category of land use and vegetation between these and went to the area to validate each category. With these maps the models of urban growth were designed using Markov chains and cellular automata; the model was validated making a prognosis for the year 2011 and comparing the results with the V series. A model was elaborated using logistic regression to know which were the variables influencing the urban growth.

Another model was built with Multicriteria evaluation technique, using weighted linear combination, weighting criteria with the technique Saaty. 7 types of vegetation were identified in the area: oak forest, disturbed forest, fir forest, pine forest, pine-oak, scrub matorral crasicaule, grassland induced by man, seasonal agriculture and urban land. Between series I and V, the urban area increased 1.6 times, according to the satellite (Landsat 8, 2014) image, however, the urban surface increased about 3 times. Close to 1,600 ha had a classification of grassland use or agriculture shifted to urban use, and 1,000 ha of oak forest had the same change. According to the logistic regression, the variables with greater influence on urban growth were: altitude, distance to water bodies, roads, streams, orientation, soil type, type of rock and soil cover. The model, built with the Series II and IV to forecast 2011 using Markov chains, gave a high value of 0.97 and 0.98 similarity (Kappa index) combined with cellular automata.

The two values of similarity were calculated comparing them with the series V, because these models were used to make the forecast of growth in the medium and long terms. Scenarios built based on the theory of Markov chains and cellular automata did not simulate changes in the growth of the urban area, however, keep in mind that there are more variables that could influence the growth. The weighting of variables was according to the index ROC, giving greater importance to the altitude, followed by the distance to towns, type of rock, distance to streets and streams. Once the weights obtained, the model was built using protected natural areas and water bodies restricted areas for urbanization. According to the MCE in scenario 2, the areas most suitable for the establishment of urban area, are those with lower altitude (2200 and 2800 msnm), are on volcaniclastic rock, are closer to road infrastructure - at least to 100 m – to human settlements (200 m), and are at least 10 m to each side of the water currents. A scenario was developed with a continuum from the more suitable areas for urban development, to the less appropriate. This work served as an exercise to know the changes of land use and vegetation that have been reported in the area between series I and V, which are important to establish policy measures to avoid the loss of certain types of vegetation and the establishment of infrastructure on sites with poor suitability. The models used in this work are a first approach to know how the systems could behave within a mathematical algorithm and thus visualize scenarios for the future.

CAPITULO I

I.1. INTRODUCCIÓN

La zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) está conformada por 59 municipios del Estado de México, 21 de Hidalgo y 16 delegaciones del Distrito Federal, es una de las más grandes e importantes de todo el mundo, aquí están centralizados los poderes del estado, un sinnúmero de empresas, comercios, hay una gran oferta de cultura y educación, espacios recreativos y otros más. La delimitación de la ZMVM ha ido cambiando a lo largo del tiempo, ya que se han incrementado municipios y por lo tanto la superficie ha cambiado, ya que para 1990 era de 7854 km² y para el 2000 fue de 7815 km². La población en este territorio, aumentó casi un 30% de 1990 a 2010 (Tabla 1). En la última década la tasa anual de crecimiento de la población total de la ZMVM fue de 0.85%; sin embargo, la dinámica poblacional es muy variable entre las tres entidades que la conforman, teniendo un 0.27% en el DF, 1.33% en el Estado de México y 2.84% en Hidalgo entre los años 2000 y 2010. Lo anterior obedece a un patrón de crecimiento periférico en los municipios vecinos (POZMVM, 2012).

Tabla 1. Crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México.

	POBLACIÓN				DENSIDAD (hab/ha)		
	1990	2000	2005	2010	2000	2005	2010
ZM Valle de México	15 563 795	18 396 677	19 239 910	20 116 842	170.7	166	160.1

Fuente: CONAPO 2000, 2005 y 2010.

De acuerdo al Programa General de Desarrollo del Distrito Federal (PGDDF) y para fines administrativos, la Ciudad de México se divide en suelo urbano y suelo de conservación, este último, por definición se refiere al espacio que por sus características ecológicas provee servicios ambientales imprescindibles para el desarrollo y mantenimiento de la calidad de vida de sus habitantes; ocupa una superficie de 87,291 ha que representa el 59% del total del D.F., en la zona de estudio se tienen 23 695 ha que equivalen al 73% del total de la zona de interés (Acuerdo. No. 1689 Tomo II, 2013).

El cambio de uso de suelo en estas zonas de conservación puede tener un impacto negativo en los servicios ambientales que ofrece, por ejemplo, en la recarga de acuíferos, captación de contaminantes de la atmósfera y pérdida de biodiversidad. En este contexto, el gobierno federal declaró zonas para la protección y conservación de los ecosistemas diferentes polígonos dentro de la Zona Metropolitana, entre ellos el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, Desierto de los Leones, así como algunos parques urbanos como las Fuentes Brotantes de Tlalpan, Lomas de Padierna y el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla que se ubican en el sur del Distrito Federal. En los municipios de Xalatlaco y Ocoyoacac se ubica el Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala la Bufa, denominado parque Otomí-Mexica.

La zona no sólo ofrece los servicios ambientales antes mencionados, además se desarrollan diversas actividades como la práctica del turismo rural y de aventura, se utiliza para fines recreativos, ecoturismo y tiene beneficios económicos diversos, entre otros. La mayoría de las prácticas productivas que se realizan causan contaminación y degradación del suelo. La compactación y el uso de agroquímicos propician que se pierda productividad, provocando una disminución en la ejecución de estas actividades, que se convierten en poco rentables (Acuerdo. No. 1689 Tomo II, 2013).

Actualmente la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) del D.F. cuenta con una mapoteca donde tiene localizados los asentamientos irregulares de las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Tlalpan reportados hasta el 2008 en la zona de estudio, con una superficie de 663 ha. Además en el portal de la PAOT existe un enlace para realizar denuncias sobre la ocupación de suelo de conservación por estos asentamientos.

Parte de la problemática de cambio de uso de suelo, es la poca oferta de áreas verdes para el esparcimiento dentro de la zona urbana, algunas delegaciones cuentan con áreas verdes de 9 a 16 m² por habitante; apenas el mínimo recomendado por los organismos internacionales (según la ONU 16 m² y la OMS 9 m²), como son: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco; el resto de las delegaciones tienen menos de 9 m² por habitante (Acuerdo. No. 1689 Tomo II, 2013). De acuerdo al programa de Rehabilitación y Reforestación de áreas verdes urbanas de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México, hasta junio del 2015 se han plantado 121 023 árboles en diferentes áreas urbanas.

Otro problema es que cierto grupo de la población que vivía en el centro de la ciudad se ha desplazado hacia la periferia por diversas razones (económicas, sociales, culturales, políticas entre otras). De esta manera, la densidad de población en el centro se redujo de 206 hab/ha en 1980 a 137 hab/ha en el 2010. Por lo contrario, la expansión hacia la periferia se manifiesta en las delegaciones del suroriente, ya que su densidad poblacional se incrementó de 57 hab/ha en 1980 a 123 hab/ha en 2010. Pero a su vez, el crecimiento urbano ha alcanzado los poblados rurales con suelo de conservación, lo que ha generado asentamientos marginales que alojan alrededor de 250 mil habitantes. Esta situación propicia grandes desplazamientos y flujos de población flotante hacia las áreas centrales, lo cual congestiona la estructura vial primaria y provoca un intenso consumo de la infraestructura y los servicios urbanos de la Ciudad (Acuerdo. No. 1689 Tomo II, 2013).

El Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF) -en su artículo séptimo- menciona que de acuerdo a las características físicas, biológicas y socioeconómicas del Suelo de Conservación, el uso actual del suelo y los impactos ambientales que las actividades humanas ejercen sobre los recursos naturales, el establecimiento de la zonificación del territorio rural en la que se distinguen ocho zonas homogéneas, denominadas unidades

ambientales. De acuerdo a esta clasificación, más de la mitad de la superficie de la zona de estudio está delimitada como forestal de conservación (Decreto. No. 139, 2000). De acuerdo a la Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de México, la zona de estudio se encuentra dentro del suelo designado a protección como área natural protegida conocida como Parque Estatal Otomí-Mexica.

Benítez et al. en 1987 describieron la vegetación de la Sierra del Ajusco siguiendo el criterio de clasificación propuesto por Rzendowski en 1978 que son: Bosque de *Pinus spp.*, *Abies religiosa*, de *Quercus spp.*, matorral de *Senecio praecox* y pastizal. Asimismo hay áreas cubiertas por cultivos, sobre todo maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), avena (*Avena sativa*), maguey (*Agave sp.*) y nabo (*Brassica napus*) (Benítez et al., 1987).

Este trabajo pretende evaluar el cambio de uso de suelo en la Sierra del Ajusco y sus alrededores desde la década de los setentas a la fecha, por medio de Sistemas de Información Geográfica y el modelado de escenarios de crecimiento urbano aplicando diferentes técnicas como la regresión logística, las cadenas de Markov, los autómatas celulares y el análisis multicriterio.

I.2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

I.2.1. Crecimiento Urbano

En México se pueden identificar tres grandes etapas de urbanización entre el siglo XX y XXI. La primera fue entre los años 1900-1940, donde la población se caracterizaba por ser mayormente rural (aproximadamente 89%). La segunda se dio entre 1940-1980 la dinámica de urbanización cambió apareciendo numerosos centros urbanos y los ya existentes crecieron vertiginosamente. En la década de los 80 la mayoría de la población cambió de rural a urbana. Finalmente entre 1980 y el 2000, el país se consolidó como urbano debido a las altas tasas de migración (Ortega-Álvarez et al., 2013).

En 2010, un grupo interinstitucional conformado por SEDESOL, CONAPO e INEGI, realizaron la delimitación de las zonas metropolitanas en México, considerando que para este año poco más del 50% de la población nacional vivía en esas zonas. Así, la delimitación de las zonas metropolitanas que realizaron estas instituciones fue basada en la cartografía geoestadística, el censo de población y vivienda 2010 y en los programas de ordenación y desarrollo urbano de zonas conurbadas y zonas metropolitanas correspondientes. De acuerdo a lo anterior se delimitó la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Sedesol-Conapo-Inegi, 2012).

De acuerdo al análisis presentado por las instituciones mencionadas anteriormente, se señala que los avances científicos y tecnológicos han cambiado y hecho más eficientes los procesos productivos, esto a su vez ha traído cambios en los patrones de movilidad y distribución espacial de la población. Así se han formado grandes conglomerados de poblaciones, que en muchas ocasiones rebasan los límites político-administrativos del territorio. Señalan que el fenómeno metropolitano está dado por cuatro elementos:

1. Un componente demográfico, expresado por un alto volumen de población y de movimientos intra-metropolitanos de tipo centro-periferia.
2. El mercado laboral, expresado por el perfil económico y de empleo y su ubicación sectorial en el territorio.
3. La conformación espacial, determinada por la expansión urbana.
4. La delimitación político-administrativa, en función de los gobiernos locales que involucra (Sedesol-Conapo-Inegi, 2012).

Un estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico -OCDE-, señala que el Valle de México pareciera no contar con los mecanismos institucionales que permitan un desarrollo urbano con los servicios e infraestructura necesarios y no sólo el crecimiento urbano sin control. Además se presentan grandes desafíos como: las desigualdades socioeconómicas que traen como consecuencia diferencia en acceso a servicios y equipamientos básicos, creciente necesidad de vivienda y suelo, la contaminación ambiental que reduce la calidad de vida de la población, entre otros (OCDE, 2015).

De acuerdo a este estudio, la ZMVM enfrenta grandes retos para rediseñar la zona metropolitana: acceso a vivienda digna, transporte público confiable y eficiente y protección ambiental, por citar algunos. Se requiere de acciones en coordinación y colaboración intergubernamental para lograr una gobernanza metropolitana que asegure la sustentabilidad de la ciudad (OCDE, 2015).

Asimismo, Rionda (2008) señala que la distribución territorial de la población se explica en parte, por el cambio del esquema de producción rígido a flexible y en parte a la reubicación de las industrias. Lo cual conlleva una alta tasa de desempleo formal, propiciando el creciente trabajo informal de tipo autoempleo. Este tipo de actividad económica atrae a la mayor parte de la fuerza de trabajo, provocando una migración interurbana. Todo lo anterior en respuesta a la producción capitalista en su fase de globalización.

Por otro lado de acuerdo a la Ley General de Asentamientos Humanos, se define textualmente lo siguiente:

Asentamiento humano: *el establecimiento de un conglomerado demográfico, con el conjunto de sus sistemas de convivencia, en un área físicamente localizada, considerando dentro de la misma los elementos naturales y las obras materiales que lo integran.*

Crecimiento: *la acción tendente a ordenar y regular la expansión física de los centros de población.*

Desarrollo urbano: *el proceso de planeación y regulación de la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población.*

De la misma forma el glosario del INEGI define lo siguiente:

Crecimiento urbano: *Expansión geográfica de una ciudad, el área urbana empieza a invadir la rural, su población se incrementa debido al desarrollo económico, aumenta la construcción de viviendas y edificaciones para empresas e industrias hacia la periferia.*

Áreas geoestadísticas básicas (AGEB) urbanas: *área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles y avenidas, cuyo uso de suelo es principalmente habitacional, industrial o de servicios, y sólo son asignadas al interior de localidades urbanas (INEGI 2010).*

Localidad urbana: *es aquella que tiene una población mayor o igual a 2500 habitantes o que es cabecera municipal (INEGI 2010).*

También la UNICEF define lo siguiente:

Crecimiento urbano: *es el aumento (relativo o absoluto) en el número de personas que viven en los pueblos y las ciudades. El ritmo de crecimiento de la población urbana depende del aumento natural de dicha población y de los nuevos habitantes que adquieren estas zonas debido, por una parte, a la migración neta del campo a las ciudades y, por otra parte, a la reclasificación de los asentamientos rurales en ciudades y pueblos (UNICEF).*

Y finalmente de acuerdo a la Real Academia Española

Urbanización: *se refiere a la acción de urbanizar que se define como acondicionar una porción de terreno y prepararlo para su uso urbano, abriendo calles y dotándolas de luz, pavimento y demás servicios.*

Todas estas definiciones nos hablan de como los asentamientos humanos desencadenan la ocupación de terrenos para satisfacer sus necesidades de bienes y servicios, así, el crecimiento urbano se ha dado desde que los seres humanos comenzaron a organizarse como sociedades, pero lamentablemente en muchos lugares se ha dado sin planeación. Es por eso que ahora se habla de desarrollo urbano como una medida para regular u ordenar la urbanización de las ciudades.

Lamentablemente el crecimiento urbano es considerado como un sinónimo de desarrollo económico de los países, sin embargo los impactos ambientales que esto ocasiona tienen que ser evaluados y estudiados. La ocupación de suelos con aptitud no urbana es uno de los principales temas a evaluar; es necesario conocer que usos de suelo fueron cambiados y con qué velocidad se hicieron, además de saber sobre qué cobertura de suelo se ejerce más presión. Lo anterior con el fin de disminuir o controlar la pérdida de ecosistemas y realizar un verdadero desarrollo urbano planificado.

El Gobierno del Distrito Federal, intentando hacer una planificación de la mancha urbana en 2010, promulga la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal que señala que se debe planear el desarrollo urbano de acuerdo a las proyecciones del crecimiento poblacional, con el fin de garantizar la sustentabilidad de la Ciudad de México, limitar la existencia de zonas unifuncionales, a través del fomento del áreas geográficas con diferentes usos de suelo.

Se han hecho algunos estudios sobre el crecimiento de la ZMVM, por ejemplo López y Plata (2009) por medio de teledetección y sistemas de información geográfica determinaron que la Zona metropolitana de la Ciudad de México en el año 2000 ocupaba una extensión de 1466 km² de área construida y que el crecimiento observado entre 1990 y el 2000 fue del 16%. La categoría sobre dónde se expandió en mayor proporción la zona urbana fue sobre las áreas de cultivo, con el 75% lo que provocó una pérdida de 153 km² de superficie.

1.2.2. Marco histórico urbano de la Ciudad de México y zona conurbada

Antes de la llegada de los españoles en la ciudad de Tenochtitlan, se construyó un sistema de diques para controlar los niveles de agua. Las condiciones topográficas, climáticas y geográficas permitieron a sus pobladores un intenso desarrollo agrícola. El régimen de propiedad de la tierra era mixto (comunal y privado), aunque también existieron formas de propiedad pública y corporativa. A partir de la conquista la propiedad indígena desapareció, sólo se conservó una forma comunal (Escobedo, 1992).

La ciudad colonial creció rápidamente sobre la zona lacustre, cubriendo las superficies destinadas a la agricultura y desarrollando un plano cuadrangular de acuerdo a los modelos españoles. Así se comienzan a formar los barrios alrededor del centro de la ciudad y en torno a las iglesias. Después de la independencia en 1821, los patrones de crecimiento no cambiaron, el alto clero sigue siendo gran propietario, hay inseguridad financiera y el gobierno es inestable,

lo anterior trae como consecuencia que la ciudad crezca lentamente y conserva su fisonomía (Escobedo, 1992).

En 1859 se expropiaron los bienes del clero y pasan a ser propiedad nacional, originando cambios en la ciudad. Durante el imperio de Maximiliano (1863-1867) las clases altas se establecen al costado del camino que iba hacia el Castillo de Chapultepec, hoy calzada de la Reforma, dejando desocupados los viejos edificios del centro, que fueron a su vez habitados por las clases sociales menos privilegiadas (Escobedo, 1992).

Durante la República, se desarrolla una política económica que fortalece el crecimiento industrial del país, impulsando la construcción de vías de comunicación. Las clases sociales altas se instalan en nuevos barrios constituidos en fraccionamientos dotados de servicios y ubicados en antiguas zonas agrícolas. Concluida la Revolución, se observa un mayor crecimiento de la ciudad. La clase media se muda hacia la periferia de la ciudad, lo cual provoca el fraccionamiento de grandes extensiones de tierra y el cambio de uso del suelo (Escobedo, 1992).

El impulso de la industria, atrajo mano de obra de las poblaciones rurales cercanas a la ciudad lo cual originó un crecimiento demográfico. La adquisición de tierra fue distribuida de manera desigual entre las clases sociales. Así, los sitios con mejores características y servicios fueron adquiridos por la población con mejores recursos (Escobedo, 1992).

La evolución del sistema urbano en México en el siglo XX, como se mencionó anteriormente, abarca tres periodos de acuerdo al ritmo de desarrollo económico del país, los cuales son: moderado – bajo de 1900 a 1940; acelerado – medio de 1940 a 1980 y bajo – acelerado de 1980 al 2005 (Garza, 2010).

A finales de los setenta es cuando ocurre el llamado “milagro económico” y el PIB crece un 6.6% anual, pero decrece al 0.01% para los años ochenta. En los noventa con la implementación de una política neoliberal se produce una recuperación económica relativa pues el PIB aumenta de 1990 a 2005 un 3.5% anual (Garza, 2010). Lo cual es importante puesto que el desarrollo económico está vinculado con la urbanización, lo anterior se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2. Población urbana entre 1970 y 2005 de la región Centro – Este que comprende el Distrito Federal, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala.

AÑO	POBLACION (miles)	URBANO (%)
1970	15 922	63.8
1980	23 534	69.1
1990	27 073	75.2
1995	30 501	75.9
2000	32 936	77
2005	34 736	77.5

Fuente: Garza, 2005.

Sin embargo en la última década del siglo XX la expansión urbana en el país frena su velocidad, la tasa de urbanización se reduce al 0.7%, esto se debe en parte a una pequeña recuperación del sector primario (el PIB agrícola aumenta 2.2% anual) frenando la emigración del campo a la ciudad. Pero en términos absolutos, la Ciudad de México eleva su población de 23 a 27 mil habitantes de los ochenta a los noventa (Tabla 2) (Garza, 2010).

A inicios de los años ochenta se unen las zonas metropolitanas del Valle de México y de Toluca, puesto que dos de los municipios que las integran comparten límites. Con ello se forma lo que se puede denominar la megalópolis de la Ciudad de México (Garza, 2010).

De acuerdo Garza en 2010, señala que la región Centro – Este, donde está inmersa la Ciudad de México y el Estado de México incrementará a 36.8 millones su población total de los cuales 32.1 serían urbanos. Y para 2020, señala que México será un país altamente urbanizado con un nivel de 85.9% (Garza, 2010).

1.2.3. Marco normativo referente al crecimiento urbano

En México la implementación de políticas de ordenamiento territorial comenzó desde 1976 con la formulación de la Ley General de Asentamientos Humanos.

Además desde los ochenta existe normatividad a nivel federal que señala que se debe buscar un desarrollo urbano, evitando esquemas segregados o uni-funcionales (LGEEPA, 1988). Por otro lado tanto en el Estado de México como en el Distrito Federal se le da la atribución del ordenamiento territorial de los asentamientos humanos a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. Posteriormente en los noventa, en el Estado de México por medio de la Ley de Asentamientos Humanos (LGAH) se fijan las disposiciones básicas para ordenarlos y regularlos.

La problemática de la migración de zonas rurales a urbanas en parte se debe a la falta de incentivos en las actividades productivas de estas poblaciones, por ello en 2001 se promueve el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural, fomentando siempre la conservación de los recursos naturales, haciendo un aprovechamiento sustentable (LDRS, 2001). El Estado de México por su lado, pretende regular el ordenamiento territorial de los asentamientos humanos para promover el desarrollo social y económico de sus habitantes (CAEM, 2001). El Distrito Federal igualmente pretende retribuir a los núcleos agrarios y pequeños productores por la protección y conservación de los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas en el suelo de conservación (LRPSASCDF, 2006).

En el Distrito Federal se cuenta con diferentes leyes y reglamentos para la regulación de los asentamientos humanos, propiciando un desarrollo sustentable en base a las proyecciones de crecimiento poblacional. Según esta normatividad se debe respetar la aptitud de suelo que tiene las diferentes superficies con el fin de conservar la diversidad biológica. En caso de incumplimiento, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal

está facultada para recibir y atender las denuncias correspondientes en este ámbito. Por su lado a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal corresponderá las acciones de supervisión y vigilancia para comprobar el cumplimiento de la normatividad vigente en esta materia (tabla 3).

Sin embargo, la PAOT señala que pese a existir un marco normativo urbano ambiental en el Distrito Federal, existen varios inconvenientes por los cuales, no se aplica o no cumple con su esencia que es el regular el establecimiento de los asentamientos humanos y demás infraestructura urbana. Lo anterior genera impactos que han provocado la pérdida del patrimonio ambiental y urbano, entre los cuales cita: el uso ilegal del suelo urbano, gestión inadecuada del suelo de conservación, uso indebido del patrimonio urbanístico – arquitectónico, destrucción y deterioro de las áreas verdes y áreas con estatus de protección, violación de la normatividad ambiental (ruidos, residuos, agua, entre otros) y manejo y disposición inadecuada de los residuos sólidos (PAOT, 2015).

Tabla 3. Normatividad referente al desarrollo urbano y ordenamiento territorial.

Orden de Gobierno	Ley, Decreto, Norma, Convenio, Código	Año	Contenido General
Federal	CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	1917	Artículo 27. La nación dictará las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población.
	LEY DE DESARROLLO RURAL SUSTENTABLE	2001	El Estado promoverá el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural, a través del fomento de las actividades productivas y desarrollo social. Uno de los objetivos será fomentar la conservación de la biodiversidad y el mejoramiento de la calidad de los recursos naturales, mediante su aprovechamiento sustentable.
	LEY FEDERAL DE RESPONSABILIDAD AMBIENTAL	2013	Regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños. Puede existir sanción por cambio de uso de suelo en terrenos forestales, y se llevará a cabo en términos de lo dispuesto en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

Orden de Gobierno	Ley, Decreto, Norma, Convenio, Código	Año	Contenido General
Federal	LEY GENERAL DE ASENTAMIENTOS HUMANOS	1976	Cuyo objeto es fijar las normas básicas para planear y regular el ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población
	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE	1988	La planeación del desarrollo urbano considerara la determinación de los usos de suelo, buscando lograr una diversidad y eficiencia de los mismos, evitando el desarrollo de esquemas segregados o unifuncionales, así como las tendencias a la suburbanización excesiva.
	REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO	2003	El programa de ordenamiento ecológico general del territorio tendrá por objeto establecer los lineamientos y estrategias ecológicas necesarias para: orientar la ubicación de las actividades productivas y los asentamientos humanos, en concordancia con otras leyes, normas y programas vigentes.
Estado de México	CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO DE MÉXICO	1917	En materia metropolitana, el Gobierno del Estado y los Ayuntamientos de los municipios deberán participar en la planeación y ejecución de acciones coordinadas con la Federación en materia de asentamientos humanos, protección al ambiente, restauración del equilibrio ecológico, entre otros.
	CÓDIGO ADMINISTRATIVO DEL ESTADO DE MEXICO	2001	Regula en materia de ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y del desarrollo urbano de los centros de población a fin de promover el desarrollo social y económico del Estado de México. Se debe respetar el ordenamiento ecológico del territorio procurando garantizar los derechos de la población a un desarrollo urbano sustentable. Para ordenar y regular los asentamientos humanos el territorio estatal, el suelo se clasificará en áreas aptas y no aptas para el desarrollo urbano.
	LEY QUE CREA EL ORGANISMO PÚBLICO DESCENTRALIZADO DE CARACTER ESTATAL DENOMINADO INSTITUTO MEXIQUENSE DE LA VIVIENDA SOCIAL	2003	El instituto tiene la atribución de regular los asentamientos humanos, la tenencia de la tierra. Obtener las autorizaciones para explotar por sí o con terceros los recursos naturales aprovechables en las obras de urbanización y construcción. Evitar el establecimiento de asentamientos humanos irregulares.

Orden de Gobierno	Ley, Decreto, Norma, Convenio, Código	Año	Contenido General
Estado de México	LEY DE ASENTAMIENTOS HUMANOS DEL ESTADO DE MEXICO	1993	Fija las disposiciones básicas para planear, ordenar y regular los asentamientos humanos en el Estado y la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población
	LEY ORGÁNICA DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA DEL ESTADO DE MÉXICO	1981	La Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda es la dependencia encargada del ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y de regular el desarrollo urbano de los centros de población y vivienda. Formular los proyectos de declaratorias sobre provisiones, reservas, destinos y usos de suelo.
Distrito Federal	LEY DE DESARROLLO METROPOLITANO PARA EL DISTRITO FEDERAL	2008	Establece los lineamientos y bases generales para una planeación estratégica que fomente el desarrollo armónico y sustentable y una adecuada coordinación entre los diferentes órdenes de gobierno. Se deben realizar estudios e investigación para proponer proyectos que generen un desarrollo metropolitano
	LEY DE DESARROLLO URBANO DEL DISTRITO FEDERAL.	2010	Tiene por objeto planear el desarrollo urbano, con base en proyecciones del crecimiento poblacional de la ciudad de México, a fin de garantizar su sustentabilidad. Se expedirán las normas de ordenación que establezcan las especificaciones para los usos y aprovechamientos del suelo.
	LEY AMBIENTAL DEL DISTRITO FEDERAL	2000	En su capítulo IV señala que los Programas de Desarrollo Urbano tendrán que considerar el ordenamiento ecológico, que tiene por objeto regular el uso del suelo, en el suelo de conservación, para hacer compatible la conservación de la biodiversidad con el desarrollo regional.
	LEY ORGÁNICA DE LA PROCURADURÍA AMBIENTAL Y DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL DISTRITO FEDERAL Y SU REGLAMENTO	2001	Tiene por objeto establecer las atribuciones y procedimientos de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal. Es su función recibir y atender denuncias referentes a la violación, incumplimiento o falta de aplicación de disposiciones jurídicas en materia ambiental y del ordenamiento territorial.

Orden de Gobierno	Ley, Decreto, Norma, Convenio, Código	Año	Contenido General
Distrito Federal	LEY PARA LA RETRIBUCIÓN POR LA PROTECCIÓN DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES DEL SUELO DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL Y SU REGLAMENTO	2006	Su objetivo es establecer los mecanismos para retribuir a los núcleos agrarios y pequeños productores del suelo de conservación, por la protección, conservación o ampliación de los servicios ambientales que brinda a los habitantes del DF. Así como el desarrollo de actividades productivas vinculadas al desarrollo sustentable.
	LEY AMBIENTAL DE PROTECCIÓN A LA TIERRA EN EL DISTRITO FEDERAL	2000	Corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal retirar a las personas que integren asentamientos humanos en contravención de los programas de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico del territorio. Realizar acciones de vigilancia y supervisión para verificar el cumplimiento de la ley. Así como preservar las áreas rurales, de uso agropecuario y forestal y todas las áreas existentes en suelo de conservación, evitando su fraccionamiento para fines de desarrollo urbano.
	LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA DEL DISTRITO FEDERAL	1998	A la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda le corresponde el despacho de las materias relativas a la reordenación y desarrollo urbano, por lo que tiene como atribución el formular, coordinar y evaluar el Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal.
	PLAN RECTOR DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DEL DISTRITO FEDERAL	2010	Son actividades prohibidas dentro de las ANP el establecer construcciones con fines habitacionales o infraestructura de desarrollo urbano; el establecimiento de cualquier asentamiento humano irregular y de nuevos asentamientos humanos regulares o su expansión territorial.
	REGLAMENTO DEL CONSEJO PARA EL DESARROLLO URBANO SUSTENTABLE DEL DISTRITO FEDERAL	2014	El Consejo para el desarrollo urbano sustentable, tiene entre otras funciones, analizar y opinar sobre los proyectos relevantes que incidan directa o indirectamente en el desarrollo urbano sustentable y el ordenamiento del territorio.
	REGLAMENTO DE LA LEY DE DESARROLLO URBANO DEL DISTRITO FEDERAL	2004	El sistema de información geográfica es un instrumento de ejecución que permitirá la regulación, fomento y modernización de la planeación urbana, al sistematizar mucha información. Esto servirá para que pueda ser consultado un predio y conocer los usos y restricciones que posee.

Orden de Gobierno	Ley, Decreto, Norma, Convenio, Código	Año	Contenido General
Distrito Federal	REGLAMENTO PARA EL ORDENAMIENTO DEL PAISAJE URBANO DEL DISTRITO FEDERAL	2005	Tiene por objeto fijar las normas básicas para la protección, conservación, recuperación y consolidación del paisaje urbano del DF, así como de los elementos que lo componen.

I.2.3.1. Planes de ordenamiento ecológico y territorial POEGT, POZMVM, POETEM y PGOEDF

En México a partir de 1940 se inicia con la implementación de políticas de planeación tendientes a dar respuesta a los problemas del crecimiento urbano acelerado y desordenado, entre otros. En 1976 por primera vez se establece el concepto de ordenamiento territorial en relación con los asentamientos humanos en la LGAH con el objetivo de lograr una distribución sustentable de la población y las actividades económicas.

En 1982 aparece la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecológico, quien tiene entre otras atribuciones lo referente a la protección del ambiente y el ordenamiento ecológico, el cual aparece por primera vez en la Ley Federal de Protección al Ambiente.

En la reforma hecha en 1996 a la LGEEPA se incorpora el ordenamiento ecológico como el instrumento de política ambiental con un impacto en el territorio, puesto que se dirige a regular el uso del suelo.

En 1999 se constituyó el grupo interinstitucional de Ordenamiento Territorial conformado por la SEMARNAT, CONAPO, SEGOB, INEGI y SEDESOL con el fin de impulsar la elaboración de los programas de ordenamiento estatales y municipales, con un enfoque integral y de desarrollo sustentable (Sánchez et al., 2013).

En este entendido se expidieron entre otros programas los siguientes:

Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (POEGT)

En 2012 se expide y contiene la regionalización ecológica y los lineamientos y estrategias ecológicas para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. De esta forma el territorio nacional fue dividido en unidades ambientales biofísicas, que son diferenciadas de acuerdo a la homogeneidad de los principales factores del medio biofísico, como el relieve, el clima, la vegetación y el suelo.

Una de las estrategias está enfocada a frenar la expansión desordenada de las ciudades, dotándolas de suelo apto para el desarrollo urbano. Algunas de las acciones que se tienen que llevar a cabo para lograrlo son: acelerar la regularización de los predios y propiciar un desarrollo más ordenado y menos disperso.

De acuerdo a esta regionalización, la zona de interés es considerada para realizar acciones tendientes al aprovechamiento sustentable, protección, restauración y preservación. En esta zona que contempla al Distrito Federal, el Estado de México y Morelos, una de las estrategias dirigidas al mejoramiento del sistema social e infraestructura, propone generar las condiciones necesarias para el desarrollo de las ciudades metropolitanas para que sean seguras, competitivas, sustentables y menos costosas (POEGT, 2012).

Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle De México (POZMVM)

Se creó la Comisión Metropolitana de Asentamientos Humanos (COMETAH) mediante un convenio firmado entre los gobiernos del Distrito Federal, el Estado de México y la Secretaría de Desarrollo Social con el fin de planificar la expansión urbana de la gran metrópoli del Valle de México (POZMVM, 1998).

De acuerdo a este programa, se requiere generar un escenario demográfico programado, para reducir la actual tendencia de crecimiento de la ZMVM, esto pretende lograrse apoyando el desarrollo en otras regiones del país, así como una mayor retención de la población del DF y una disminución significativa del crecimiento de los municipios metropolitanos.

Además propone evitar el crecimiento extensivo e indiscriminado de la ciudad sobre zonas importantes para la conservación de la biodiversidad y recarga acuífera. Para lograrlo se plantea la saturación y densificación de las áreas ya urbanizadas y proponer áreas no urbanizables.

Las áreas no urbanizables serán definidas por su alto valor ecológico, por su producción agrícola o forestal, o las que fueron identificadas como vulnerables o riesgosas para el desarrollo urbano.

Para facilitar la adopción de las políticas de ordenación del Valle de México, su territorio se dividió en 12 regiones de planeación denominadas sectores metropolitanos. La región 5 denominada Metropolitano Sur, está integrada por Huixquilucan, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Tlalpan, Xochimilco y Coyoacán. Aquí existen áreas no urbanizables y áreas urbanizadas, las cuales contemplan políticas de reciclamiento, desarrollo, mejoramiento e integración metropolitana (POZMVM, 1998).

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (POETEM)

La Secretaría de Ecología del gobierno del Estado de México, elaboró el programa de ordenamiento, el cual tiene por objetivo inducir el uso de suelo y las actividades productivas en el territorio del estado, con la finalidad de lograr la protección del ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos y elementos naturales.

Se realizó la regionalización del territorio, mediante el análisis multivariado de factores. Se identificaron 602 unidades ecológicas, lo anterior con el fin de orientar el aprovechamiento de sus recursos de acuerdo a las cualidades específicas de cada una. Además dentro de estas unidades ecológicas, se definen las zonas de atención prioritaria: las unidades ecológicas con

acelerados procesos de erosión, la cuenca del Río Lerma, el Valle Cuautitlán – Texcoco, el territorio susceptible de recarga, zonas de alta productividad agrícola, áreas con alto rendimiento pecuario, forestal, acuícola y minero, la región hortícola y florícola, las unidades sujetas a inundación, desertificación, fenómenos volcánicos y tectónicos y las áreas naturales protegidas.

La zona de interés de este estudio está dentro del Parque Estatal Otomí – Mexica, por lo que se considera como un área de atención prioritaria que debe protegerse y conservarse. Dentro de los criterios del POETEM señala que se impulsará la delimitación física en las ANP con mayor presión demográfica como es el caso del Parque Otomí- Mexica, la Sierra de Morelos y la Sierra de Tepetzotlán. También indica que se deberán crear franjas de amortiguamiento (de por lo menos 50 m) y desarrollar en ellas programas de reforestación, ecoturismo, acuacultura u otros (POETEM).

Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF)

El PGOEDF tiene su ámbito de aplicación en el suelo de conservación. Con el fin de identificar la aptitud de suelo que tiene dicho suelo para el desarrollo de distintas actividades. Dicha zonificación se enfocará en cuatro políticas principales las cuales son: conservación, protección ecológica, restauración del equilibrio ecológico y aprovechamiento sustentable (Decreto. No. 139, 2000).

La zonificación del territorio rural fue considerando las características físicas, biológicas y socioeconómicas del suelo de conservación, de esta manera, se determinaron ocho zonas homogéneas, denominadas unidades ambientales, cuyas características están asociadas a su capacidad para sostener actividades productivas, recarga el acuífero y conservar la biodiversidad. Las ocho zonas son:

1. Forestal de Conservación.- Zonas que se caracterizan por tener grandes extensiones de vegetación natural, que favorecen la recarga de acuíferos y la conservación de la biodiversidad. Debido a esto y los servicios ambientales que provee a la población se hace imprescindible su conservación.
2. Forestal de Conservación Especial.- En esta área se desarrollan actividades productivas y turísticas que generan recursos económicos a las comunidades de la zona. Dichas actividades deben ser reguladas para hacerlas compatibles con la importancia biológica y ambiental de la zona.
3. Forestal de Protección.- Estas áreas constituyen la frontera forestal con las zonas que desarrollan actividades agrícolas y pecuarias. Se deberá evitar las prácticas que alteren la estructura y función del suelo y de los ecosistemas naturales.
4. Forestal de Protección Especial.- Son terrenos preferentemente forestales, con áreas que contienen vegetación natural en buen estado de conservación. Aquí se desarrollan

actividades productivas que requieren una regulación a través de un manejo ambiental racional y planificado de los recursos naturales.

5. Agroforestal.- Es una zonificación de transición entre el bosque y las tierras de cultivo, con terrenos considerados preferentemente forestales, donde se desarrollan actividades agrícolas y pecuarias con mayor intensidad.
6. Agroforestal Especial.- Dentro de esta zona hay zacatonales que resguardan especies endémicas. Está ubicada en los límites de la zona forestal de conservación, se establece una normatividad ambiental específica para hacer compatibles las actividades productivas que se desarrollan.
7. Agroecológica.- Esta categoría agrupó aquellas áreas con alto potencial para el desarrollo de actividades productivas agrícolas y pecuarias; en éstas áreas se deberá evitar las prácticas que alteren la capacidad física y productiva del suelo y de los recursos naturales.
8. Agroecológica Especial.- Debido a su vulnerabilidad, se aplica una regulación especial, a fin de conservar sus valores ecológicos, tradicionales y culturales. Se debe fomentar su conservación.

Adicionalmente a esta zonificación se considera la superficie de las Áreas Naturales Protegidas y los Programas de Desarrollo Urbano vigentes (Decreto. No. 139, 2000).

I.2.4. Zonas restrictivas para el desarrollo urbano

I.2.4.1. Áreas Naturales Protegidas (ANP)

El PGOEDF considera las Áreas Naturales Protegidas con declaratorias de carácter local y federal, que están dentro de ecosistemas representativos del suelo de conservación y en área urbana, como zonas que deben tener un carácter restrictivo para el crecimiento urbano, pero cada una debería contar con un Plan de Manejo que incluya las actividades que se pueden desarrollar de acuerdo a su zonificación. Algunas de ellas son de reserva, protección, restauración, recreativas o productivas, por citar algunas. En este sentido, la zona de estudio cuenta en el D.F. con una superficie de 6170 ha con alguna categoría de protección, 5 de ellas tienen decreto federal y las demás no lo tienen pero se realizan actividades para su protección (Decreto. No. 139, 2000). Para el Estado de México se consideran 2197 ha dentro del parque estatal Otomí—Mexica (Decreto. Tomo CXXIX. Número 4, 1980).

Si bien algunas de estas zonas fueron decretadas desde los años treinta y desde entonces el crecimiento urbano no siempre ha respetado sus límites para el desarrollo de actividades urbanas, también se han dado esfuerzos considerables por parte de la sociedad para ayudar en la conservación de estos espacios, intentando preservar lo mejor posible sus características naturales. Los parques nacionales dentro del área tienen las siguientes características:

Parque Nacional (PN) “Lomas de Padierna”

Fue decretado en 1938 por el entonces presidente Lázaro Cárdenas, en virtud que fue el campo donde se desarrolló la batalla del 20 de Agosto de 1847, durante la guerra de la intervención norteamericana y por ello se levantó allí un monumento, por este valor histórico y por la necesidad de construir un atractivo turístico para los pueblos de San Jerónimo, La Magdalena, Santa Teresa y los demás poblados de la región.

Así se declara que es obligación del Departamento Forestal de Caza y Pesca, el Departamento del Distrito Federal, la Secretaría de la Defensa Nacional, La Secretaría de Educación Pública y vecinos de la región el establecimiento de viveros para llevar a cabo la reforestación del parque y el cuidado y embellecimiento del monumento a los Héroes de Padierna (SEMARNAP y RDS, 2000).

Es administrado por la CONANP y el Gobierno del Distrito Federal, se encuentra dentro de los límites de la Delegación Magdalena Contreras y una pequeña superficie en la Delegación Álvaro Obregón, tiene una superficie total de 1 161.21 ha. No cuenta con un plan de manejo (SIMEC). Actualmente en este PN sólo el Cerro del Judío se encuentra desprovisto de infraestructura urbana y con arbolado (32.16 ha) (figura 5).

Parque Nacional “Fuentes Brotantes de Tlalpan”

Fue decretado en 1936 por el entonces presidente Lázaro Cárdenas, ya que en esta zona emergían a la superficie agua de los manantiales al fondo de la barranca que estaba cubierta de arbolado. Además el Gobierno de la República pretendía formar un cuerpo de policía forestal, así este lugar sería de utilidad para la enseñanza y práctica de reforestación de zonas desprovistas de arbolado dentro del PN y con ello podría contar con un cuerpo de policía forestal preparado para garantizar la conservación de los bosques. Así mismo se establecería un vivero piscícola para la producción de especies finas de pescado (SEMARNAP y RDS, 2000).

Tiene una superficie de 129 ha dentro de la Delegación Tlalpan y es administrado por la CONANP y el Gobierno del Distrito Federal. No cuenta con Plan de Manejo (SIMEC). Actualmente sólo 22 ha quedan cubiertas de arbolado y hay un lago donde se desarrollan diferentes actividades recreativas (figura 5).

Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla

Fue decretado en 1936 considerando que la extensa planicie conocida como “Llanos de Salazar” fue el lugar de batallas y triunfos del Ejército Liberador durante la guerra de Independencia, además de ser un sitio donde se ha venerado la figura del insurgente Miguel Hidalgo y Costilla.

En la zona se encontraban manantiales y arroyos de excelente calidad donde se podrían propagar peces adecuados para la alimentación y con ello establecer una estación piscícola

que serviría como instrumento de educación para los turistas sobre la propagación científica de los peces.

Además el decreto señala que para conservar la pureza de las aguas que corren en el PN es necesario conservar los suelos y vegetación para impedir la erosión que podría azolar los cauces, así como conservar la peculiar belleza del paisaje.

Así el PN pretende la conservación de la flora y fauna, de las aguas y la porción de terrenos montañosos. Es administrado por la CONANP, el Gobierno del Distrito Federal y el del Estado de México, puesto que se encuentra dentro de los municipios de Huixquilucan, Ocoyoacac y la delegación Cuajimalpa. No cuenta con Plan de Manejo. Tiene una superficie total de 1889.96 ha, de las cuales únicamente 27 ha están consideradas dentro del área de interés para este estudio (SIMEC).

Este parque es mejor conocido como “La marquesa” y es un sitio utilizado por los habitantes de la Ciudad de México y Toluca principalmente como zona recreativa y de descanso (SEMARNAP y RDS, 2000).

Parque Nacional “Desierto de los Leones”

Fue decretado en 1917 considerando la belleza natural de sus paisajes y por el interés histórico de las ruinas que allí se encuentran, así como por su proximidad a la capital de la República.

El decreto señala que la Secretaría de Fomento queda autorizada para la explotación de productos como maderas muertas, árboles enfermos, defectuosos o caducos y todos aquellos que alteren el buen desarrollo de la vegetación principal.

Tiene una superficie total de 1529 ha y es administrado por el Gobierno del Distrito Federal y la CONANP, está ubicado dentro de los límites políticos de las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa.

El Programa de Manejo Ambiental fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de junio del 2006. En este se señala que el principal objetivo es la preservación de sus recursos naturales y los bienes y servicios ambientales que proporciona a la Ciudad de México. Dentro de sus límites crece bosque de oyamel, pino y bosques mixtos, los cuales forman un continuo con la Sierra de las Cruces, que representa un corredor biológico de fauna silvestre. Además el parque ofrece oportunidades de esparcimiento y recreación cultural, al contar con el Antiguo Convento Carmelita del siglo XVII. Dicho programa es un instrumento de planeación y normatividad, con base en la problemática ambiental y social que existe en el área. Su propósito es establecer los lineamientos y estrategias que permitan un manejo sostenible de sus recursos, integrando a los diferentes actores presentes en el área (SEMARNAP y RDS, 2000).

De acuerdo al Plan de Manejo se identificaron siete factores principales que están contribuyendo al deterioro de los ecosistemas del PN, los cuales son:

- Efectos de la contaminación (atmosférica, agua y suelo)
- Falta de manejo de la vegetación forestal, con fines de conservación
- Extracción desordenada de agua en las partes altas
- Presencia de fauna feral
- Recreación desordenada y creciente práctica de deportes extremos que causan un alto impacto en las zonas frágiles del parque
- Problemas con la tenencia de la tierra
- Control y erradicación de especies exóticas establecidas

Parque Nacional “Cumbres del Ajusco”

Fue decretado en 1936 considerando que la Sierra del Ajusco es una de las más portentosas y significativas por sus grandes contrastes orográficos y al estar ubicada muy cerca de los centros más poblados del país, es un lugar de recreación.

Además al ser barrera de corrientes de aire, mantienen un equilibrio climático de las regiones vecinas. Delimita una cuenca hidrográfica importante y a su vez sirve como sostén del régimen hidráulico del valle, al estar cubierta de bosques que evitan la erosión del suelo.

Sus cumbres están cubiertas de árboles propios de climas fríos, en contraste con el territorio intertropical que se extiende en las partes bajas de sus vertientes, donde existe una fauna integrada por animales especiales, lo que le da un alto valor científico y turístico. Todo lo anterior lo hace un lugar destinado a la conservación de flora y fauna de la región.

De acuerdo al Decreto Presidencial del 19 de mayo de 1947, se modificaron los linderos del PN Cumbres del Ajusco, quedando de la forma siguiente: cota sobre los 3500 msnm en el Cerro del Ajusco (Pico del Águila) en una superficie de 920 ha, con jurisdicción de la Delegación Tlalpan.

Es administrada por la CONANP y el Gobierno del Distrito Federal. No cuenta con Plan de Manejo (SIMEC)

De acuerdo al Estudio Técnico Justificativo al que se hace referencia en el acuerdo publicado en el DOF el 16 de abril de 1999, señala que el área ha perdido superficie y sus ecosistemas se encuentran muy deteriorados, esto está dado principalmente por el uso recreativo intensivo e inadecuado (SEMARNAP y RDS, 2000).

Reserva ecológica comunitaria “San Nicolás Totolapan”

El 29 de noviembre de 2006 en la Gaceta Oficial del Distrito Federal se publicó el decreto por medio del cual se establece como área natural protegida, con la categoría de reserva ecológica comunitaria a la zona conocida como “San Nicolás Totolapan”.

Esta categoría de acuerdo a la Ley Ambiental del Distrito Federal, se refiere a las áreas que por sus características ecogeográficas, contenido de especies, bienes y servicios ambientales y

culturales que proporcionan a la población, hacen imprescindible su preservación. Estas áreas son propuestas por los pueblos, comunidades y ejidos en terrenos de su propiedad, para destinarlos a la preservación y protección de la biodiversidad y del equilibrio ecológico, sin que se modifique su régimen de propiedad.

De acuerdo al PGOEDF el ejido de San Nicolás Totolapan, está compuesto por 336 ejidatarios que conforman la Asociación Civil del Parque Ejidal San Nicolás Totolapan. Quienes en 1998 inauguran el parque como parte de un proyecto social de turismo en la naturaleza, con la visión de detener el crecimiento de la mancha urbana. Tiene una superficie de aproximadamente 2000 ha donde crece el bosque templado en un rango altitudinal de los 2700 a los 3740 msnm. Forma parte del eje Neovolcánico Transversal y está dominado por formaciones montañosas y cañadas, por las cuales escurren innumerables arroyos. Su flora está compuesta principalmente por encinares, bosques mixtos, pinares y oyameles.

Esta asociación ofrece diversos servicios de ecoturismo como el senderismo con vistas escénicas especiales, así como el deleite de comida tradicional. Además cuentan con un compostero para los residuos orgánicos, viveros, granja didáctica, biodigestores, construcción de tinas ciegas y zanjas de infiltración (Ejido San Nicolás Totolapan A. C.).

La flora de la zona está representada por al menos 10 familias, distribuidas en 79 géneros y 104 especies. Además se han registrado 112 especies de vertebrados agrupados dentro de las clases Amphibia, Reptilia, Mammalia y Aves.

Por todo lo anterior se declara este ejido como Reserva Ecológica Comunitaria, ubicada en las delegaciones Magdalena Contreras y Tlalpan con una superficie total de 1,984.70 ha.

En el artículo séptimo de dicho decreto, señala que no se permitirá el establecimiento de cualquier asentamiento humano irregular, y de nuevos asentamientos humanos regulares o su expansión territorial.

El ejido de San Nicolás Totolapan tendrá a su cargo la administración del ANP (SEMARNAP y RDS, 2000).

Zona de conservación ecológica conocida con el nombre de “Ecoguardas”

El 29 de noviembre de 2006 en la Gaceta Oficial del Distrito Federal se publicó el decreto por el que se establece como Área Natural Protegida del Distrito Federal con categoría de zona de conservación ecológica, el área conocida con el nombre de “Ecoguardas”.

Lo anterior considerando que de acuerdo a los estudios realizados en la zona, se encuentra cubierta por vegetación y fauna representativa del Pedregal de San Ángel y representa una zona para la continuidad de los procesos evolutivos y por lo tanto la permanencia de especies silvestres. Cuenta con un registro de 239 especies vegetales, de las cuales 11 están bajo categorías especiales de protección. Además de 136 especies de fauna silvestre, de las cuales 15 son consideradas bajo categorías especiales dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2001.

Asimismo la zona ofrece diversos servicios ambientales como: barrera contra el viento, polvo y ruido, contribución a la regulación del clima y captación de agua e infiltración para la recarga del acuífero. Brinda espacios para el desarrollo de diversas actividades como la educación ambiental y la recreación.

Por ser de utilidad pública e interés social, se establece el ANP con una superficie total de 132.63 ha ubicadas en la Delegación Tlalpan.

De acuerdo al artículo sexto se dicho decreto, está prohibido el uso de suelo para vivienda dentro del ANP.

La administración de dicha área estará a cargo de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (SEMARNAP y RDS, 2000).

Reserva ecológica comunitaria “San Miguel Topilejo”

El 26 de junio de 2007 en la Gaceta Oficial del Distrito Federal se publicó el decreto por medio del cual se establece como área natural protegida, con la categoría de reserva ecológica comunitaria a la zona conocida como “San Miguel Topilejo”.

Considerando que en terrenos comunales de San Miguel Topilejo, se ubica una superficie con vegetación natural en buen estado de conservación. Con un registro de 543 especies de plantas vasculares, distribuidas en 266 géneros y 77 familias, además de 118 especies de vertebrados agrupados dentro de las clases Amphibia, Reptilia, Mammalia y Aves. Además de proveer de servicios ambientales y recreativos a los habitantes del DF y zonas aledañas.

La comunidad de San Miguel Topilejo aprobó el establecimiento de la Reserva Ecológica Comunitaria en asamblea. Está ubicada en la Delegación Tlalpan y tiene una superficie total de 6,000 ha.

En el artículo séptimo de dicho decreto, señala que no se permitirá el establecimiento de cualquier asentamiento humano irregular y de nuevos asentamientos humanos regulares o su expansión territorial.

En la zona se podrán realizar actividades de protección, preservación, restauración y aprovechamiento sustentable y controlado de los recursos naturales con la finalidad de asegurar la conservación de la diversidad biológica local.

La comunidad de San Miguel Topilejo tendrá a su cargo la administración del ANP (SEMARNAP y RDS, 2000).

Parque Ecológico de la Ciudad de México

De acuerdo al decreto publicado en el DOF el 03 de julio de 1989 se declaró una superficie de 727.61 ha ubicadas en la zona norte de la delegación Tlalpan con la categoría de Zona sujeta a conservación ecológica.

La zona presenta un clima templado húmedo, predominando el matorral xerófilo y en menor cantidad el bosque de encinos y pinos. La fauna está representada por algunos anfibios, reptiles y mamíferos de pequeña talla.

La zona al estar ubicada en Tlalpan y formar parte del Ajusco medio, tiene una gran importancia desde el punto de vista hidrológico, ya que sus formaciones rocosas de gran porosidad, permiten la infiltración del agua de lluvia, que ayuda a la recarga de los mantos acuíferos.

De acuerdo a la PAOT de las 727.61 ha, 66.1 están ocupadas por diferentes asentamientos humanos. El decreto de este parque señala que de permitirse el establecimiento de pobladores en la zona y de no tomarse las medidas que los eviten, se generarían fuentes de contaminación por desechos y obstrucción de los suelos, perdiendo su permeabilidad lo cual impediría la alimentación de los mantos acuíferos (PAOT, 2009).

Por lo anterior de acuerdo al artículo 3° del decreto, se hace necesario que el área que está dentro del parque sea expropiada conjuntamente con sus construcciones e instalaciones en favor del Departamento del DF, a fin de que éste en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, se haga cargo de la conservación y mantenimiento de dicha área.

De acuerdo al artículo 6° será necesario formular el Programa de Manejo de la zona el cual contendrá los elementos que establece la LGEEPA, así como otras medidas que tienden a la regeneración de su vegetación nativa, la protección, preservación y rescate de la flora y fauna típicas, prácticas de conservación de suelo y agua, el control de plagas y enfermedades y fomentar el carácter que como reserva biótica, tiene la zona del Valle de México.

Parque ecológico turístico y recreativo Zempoala-La Bufa

Fue decretado el 8 de enero de 1980, ya que se consideró que era indispensable conservar la riqueza que representa la cadena montañosa comprendida entre el Macizo de Zempoala y la Sierra de la Bufa. En este lugar es posible desarrollar programas silvícola y de aprovechamiento forestal. Este parque habrá de permitir la integración de infraestructura turística. Así como evitar la erosión y destrucción de los bosques. Además aquí se evitará la proliferación indiscriminada de asentamientos humanos clandestinos.

Por todo lo anterior, se decreta la creación del Parque ecológico turístico y recreativo OTOMI-MEXICA, ZEMPOALA-LA BUFA. Tiene una superficie de 105 875 ha arriba de la cota de 2800 msnm.

En el parque se crearán escuelas agrícolas y ganaderas de montaña, así como de adiestramiento turístico. Además se realizarán obras de infraestructura para la conservación y restauración de suelos, de forestación y reforestación, así como de aprovechamiento forestal.

En este parque se construirá en centro ceremonial Otomí, como obra más representativa y simbólica. El uso del parque, será para el establecimiento de áreas deportivas, de recreo, así como instalaciones para el esparcimiento físico y mental de las comunidades y sus visitantes.

El 7 de abril de 2009 se publicó en la Gaceta de gobierno del Estado de México el Resumen Ejecutivo del Programa de Conservación y Manejo (PM) del Parque ecológico turístico y recreativo Zempoala-La Bufa, denominado Parque Otomí – Mexica. De acuerdo al PM se establece la zonificación del ANP, que son de protección, conservación, aprovechamiento y restauración.

Esta zona es muy importante debido a su extensión y por los servicios ambientales que provee a la región, así como el mantenimiento de numerosas especies de flora y fauna, además de su valor científico, educativo y de recreación.

Es administrado por la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF).

I.2.4.2. Otras áreas

Otras zonas que deben ser consideradas como restrictivas para el desarrollo urbano son las áreas de recarga de acuíferos. En la superficie de interés del presente estudio se ubica al suroeste una superficie de recarga llamada Valle de Toluca Ixtlahuaca con 1,908 ha.

De acuerdo al POETEM se considera mantener las zonas de recarga de acuíferos para la conservación de la biodiversidad. Es necesario considerar una franja de protección a lo largo de las corrientes de agua para evitar el establecimiento de asentamientos humanos.

Además en este programa señala que no se permitirá la construcción en lugares con alta incidencia de peligros naturales, como pueden ser barrancas, cárcavas, zonas de cavernas, suelos donde el nivel de los mantos freáticos sea superficial, fracturas, fallas, suelos arenosos, zonas de inundación.

También deben tomarse en cuenta los derechos de vía que tienen las líneas de alta tensión y los gasoductos (CFE, 2001), así como las zonas federales y estatales.

I.2.5. Uso y cobertura del suelo

De acuerdo a la CONABIO, el término “cobertura de suelo” se refiere a la descripción del material físico en la superficie de la tierra y está determinado por muchas variables como son: el clima, la topografía, el tipo de suelo, la altitud, entre otros. En cambio el término “uso de suelo”, está definido por las asignaciones derivadas de la actividad humana en un territorio.

La información generada sirve para realizar estudios acerca de los cambios en la cobertura y uso de suelo y así conocer y predecir las tasas de deforestación, degradación, desertificación, cambios en el clima, pérdida de biodiversidad y otros más, en un tiempo y espacio determinado.

Velázquez et al. en 2002, realizaron un trabajo para conocer los patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Utilizando y validando las bases de datos de uso de suelo y vegetación publicadas por INEGI (Serie I y II) y el inventario Forestal Nacional (2000). En este trabajo destacan que si bien las bases de datos disponibles a nivel nacional son muy extensas, es difícil hacer comparaciones entre ellas, por las escalas y las metodologías que se utilizaron para su elaboración. Los autores hicieron correcciones de los polígonos donde encontraron inconsistencias para obtener cartografía con un 95% de confiabilidad, así observaron que la categoría “otras coberturas” que incluye los asentamientos humanos, los cultivos y los pastizales inducidos son las categorías que más ganan superficie. Además de que en las imágenes de satélite hay una confusión del 28% entre las categorías de bosque de pino y bosques de pino-encino.

I.2.5.1. Cartas de uso del suelo y Vegetación

Las cartas de uso de suelo son una representación geográfica de la distribución de los diferentes tipos de vegetación y las áreas de uso agrícola, pecuario y forestal. Incluye información puntual sobre especies botánicas representativas de la cubierta vegetal; así como el uso de suelo de acuerdo al Sistema de Clasificación de la Vegetación del INEGI. La clasificación del rubro agricultura, es de acuerdo a la forma en que recibe agua el terreno donde se desarrolla, así como la duración de cultivos en el mismo.

Hasta la fecha el INEGI ha publicado 5 series de Cartas de Uso del Suelo y Vegetación (Serie I 1984, Serie II 1997, Serie III 2002, Serie IV 2010 y Serie V 2011) en escala 1:250 000.

De acuerdo al INEGI, la cartografía elaborada en escala 1:250 000 de uso de suelo y vegetación de la serie I y II se llevó a cabo por medio de 11 etapas principales que son: preparación y repartición de insumos, recopilación de información, análisis y adecuación de la información, interpretación preliminar, verificación en campo, análisis de información, preparación de originales, identificación de material botánico, elaboración de informes y resúmenes de campo, edición e impresión.

La Serie I está elaborada con información de los años 1979 a 1991, esta información estaba disponible en formato analógico y posteriormente se convirtió a formato digital. En este caso los especialistas procedían a recabar toda la información posible acerca de las actividades pecuarias, agrícolas o forestales de la zona de trabajo con apoyo de diferentes instituciones no gubernamentales, centros académicos, organizaciones que realizaran alguna investigación sobre recursos naturales, entre otros. El principal apoyo con que se contaba eran fotografías aéreas en escala 1:50 000 en blanco y negro así como fotos aéreas del Sistema Nacional de Fotografía Aérea en escala 1:75 000 de la década de los setentas, posteriormente se hacía una

fotointerpretación acerca de la cubierta vegetal y los diferentes usos de suelo de la zona. Para preparar los originales era necesario que el especialista con ayuda de un pantógrafo o apoyado en el stereosketch hiciera la transferencia de información para ajustar a la escala la información contenida en las fotografías aéreas, posteriormente se hacía la prueba de color que consistía en reproducir de manera heliográfica el resultado de la transferencia. La información de esta serie fue publicada por INEGI en 1984.

La serie II fue elaborada con datos de los años 1993-1999, en este caso, además de la búsqueda de información como se hizo con la serie I, también se apoyó con el uso de recursos electrónicos y sistemas de comunicación interbibliotecarios. Para esta serie se utilizaron los espaciomapas que son una composición de imágenes de satélite del sensor Thematic Mapper a bordo del Landsat del año 1993, recortadas, ensambladas y ajustadas geográficamente para tener cubierto una hoja en escala 1:250 000; estos espaciomapas se analizaron por medio de técnicas de percepción remota. Para actualizar los datos de uso de suelo y vegetación, se realiza sobre una película transparente y estable (acetato) que tiene como fondo el espaciomapa y un original (autopositivo). Por medio de una tableta digitalizadora, una computadora y la paquetería adecuada se hicieron la conversión de la información a formato digital (INEGI, 2005). La información de esta serie fue publicada por INEGI en 1997.

Es necesario mantener la calidad y confiabilidad de los datos geográficos, por ello el INEGI, a partir de la Serie III siguió una secuencia de cuatro etapas que permiten la comparación y verificación de los datos, las cuales son: recopilación y análisis de la información, determinación de cambios y actualización de datos, comparación de conjuntos y ajustes de continuidad y finalmente unión de conjuntos, validación y generación del continuo nacional.

El proceso de recopilación consiste en recabar antecedentes e información cartográfica y hacer una comparación con la nueva información disponible. Por medio de un análisis visual de imágenes del área, se comparan con la información previa y se confirman con visitas a campo y análisis de laboratorio de muestras botánicas en los puntos de verificación.

Para actualizar los datos se utilizan los datos de la serie anterior, se hace de manera digital por medio de interpretación directa de imágenes de satélite, se aplica una limitante de interpretación visual de escala 1:100 000 y unidades mínimas de 25 ha para elementos antropogénicos y 50 ha para elementos naturales, con restricción de edición de 100 m entre vértices y arcos paralelos.

La homogeneización geográfica es necesaria para realizar los ajustes de continuidad de las entidades geográficas, para ello se compara cada bloque con el bloque adyacente, asimismo se verifica la estructura de los datos y los agrupamientos en cada sistema de información.

Para la generación del continuo nacional se utilizan diferentes comandos en un sistema de información geográfico llamado Arc Info, en este proceso se asignan las coordenadas geográficas a la capa final (INEGI, 2002).

Así mismo en la Serie III, IV y V se incluye una clasificación de acuerdo a la información representada estas son:

1. Información agrícola-pecuaria-forestal: son los terrenos utilizados para estas actividades que han desplazado a las comunidades vegetales originales.
2. Información ecológica-florística-fisonómica: son las comunidades vegetales naturales e inducidas de acuerdo a estos criterios para establecer su caracterización.
3. Información complementaria: incluye aspectos naturales o antropogénicos que inciden directa e indirectamente en la distribución de las comunidades vegetales o de las áreas agrícolas.

La serie III está elaborada con imágenes Landsat ETM del año 2002 y respaldada con trabajos de campo de 2002, 2003 y 2004 (INEGI, 2006). Los datos de esta serie fueron publicados por INEGI en 2002.

El conjunto de datos de la serie IV contiene la información obtenida a partir de fotointerpretación de imágenes de satélite Spot 5 tomadas durante la primavera y otoño de 2007 y algunas escenas de la primavera del 2008, además del trabajo de campo realizado en otoño de 2007 y primavera-verano de 2008 (INEGI, 2010). Los datos de esta serie fueron publicados por INEGI en 2010.

La serie V contiene información de uso de suelo y vegetación obtenida a partir de fotointerpretación de imágenes de satélite Landsat TM5 seleccionadas del año 2011 y con trabajo de campo de abril a Junio de 2012 (INEGI, 2013 a). Los datos de esta serie fueron publicados por el INEGI en 2011.

I.2.6. Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta informática que sirve para ingresar, almacenar, gestionar, recuperar, actualizar, analizar y producir información y los datos que contiene, están relacionados con las características de los lugares o zonas geográficas. En el decenio de 1980 los sistemas comerciales de información geográfica alcanzaron la capacidad para permitir su rápida adopción (ONU, 2000), estos han evolucionado conforme al desarrollo de la tecnología informática. Hoy en día existen bases de datos de diferente índole, la mayoría están disponibles al público en general y algunas se reservan para usos exclusivos. No obstante esta herramienta es de gran utilidad para diversos sectores: económicos, sociales, culturales, salud, políticos y ambientales; en este último el uso de SIG ayuda a tener una visión amplia sobre los impactos que se ocasionan al medio por diferentes factores, como ejemplo tenemos los siguientes estudios realizados por medio de SIG.

- López et al. en 2001 exploraron las relaciones entre crecimiento urbano y cambios en el paisaje, así como el crecimiento urbano y el crecimiento de la población en la ciudad de Morelia, los resultados indican que la ciudad de Morelia creció 600% de 1960 a 1997.
- Weng en 2001 desarrolló una metodología para ver cómo se relacionaba el crecimiento urbano con la distribución del modelo hidrológico en Zhujiang Delta al sur de China. Por medio de sensores remotos y SIG observó que el área que presentó mayor crecimiento urbano tenía un mayor potencial para aumentar la escorrentía anual. Las áreas urbanizadas eran más propensas a la urbanización.
- García en 2008 realizó un análisis de la sustitución de las áreas naturales por las de uso urbano en Ciudad Juárez y sus zonas aledañas, encontrando que el crecimiento urbano obedece en cierta medida a la oferta de infraestructura de comunicaciones y zonas industriales.
- Akanbi et al. en 2013 aplicaron la teledetección, SIG y GPS para elaborar un Plan de Gestión Urbana (PGU) en una parte de la ciudad de Hyderabad, concluyendo que para mantener un desarrollo sustentable en la ciudad, es necesario implementar el PGU.

Algunos programas utilizados como SIG son el QGIS, IDRISI, ARCGIS, Google Earth, DIVA GIS, Mapa digital de México, entre otros.

Los sistemas de información geográfica son útiles para modelar escenarios de crecimiento urbano ya que aportan: (a) La construcción de variables de entrada para la modelación; (b) La identificación de patrones espaciales en los datos; (c) La cuantificación de los cambios temporales observados o predichos; (d) La evaluación de factores que operan cruzando una variedad de escalas, y (e) La visualización de los resultados (De Koning et al., 1999)

Un SIG almacena dos tipos de datos que se encuentran en los mapas: las definiciones geográficas de la superficie terrestre y los atributos, que son las características o cualidades que poseen. Los diferentes programas usan diferentes representaciones cartográficas, las cuales pueden ser vectorial o raster.

La representación vectorial se define por una serie de puntos que, cuando se unen con líneas, forman una representación gráfica, tiene asociada una base de datos de atributos que contiene la información de cada punto, línea o polígono.

En cambio en el formato raster, la representación geográfica de características y los atributos que éstas poseen están dentro de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas. En esta fina grilla o matriz se almacenan los datos numéricos que describen la condición o naturaleza del paisaje, como puede ser la temperatura, los cuales son utilizados tanto para el análisis como la visualización. Este tipo de formato es utilizado por diferentes programas, entre ellos IDRISI.

Los raster son útiles para representar toda la información geográfica (entidades, imágenes, superficies, puntos y otros). Además, cuentan con una amplia gama de operadores de geoprocetamiento analítico (Eastman, 2012).

I.2.6.1. Módulos utilizados para modelar el crecimiento urbano

Los SIG comerciales han ido incorporando como funciones de análisis aquéllas destinadas a la modelización. Es el caso de la función LOGISTICREG -dentro del módulo de estadísticos del software IDRISI- que permite hacer una regresión logística binomial usando como índice la probabilidad máxima, introduciendo una variable dependiente binomial y todas las variables independientes que tengan una significancia estadística (máximo 20) de influencia sobre la primera. Se puede hacer con un porcentaje de la muestra para reducir el tiempo del procesamiento. Los resultados de este proceso son un raster con las probabilidades de que una zona cumpla con el criterio establecido en la variable dependiente (ejemplo: urbano) y otro raster que mostrará como varía espacialmente la calidad del ajuste que ofrece el modelo (Chuvieco, 2014).

Otra herramienta útil para modelar escenarios de crecimiento urbano, es la función de MARKOV que está en el módulo de series de tiempo, el cual analiza dos imágenes de cobertura de suelo en dos series de tiempo distintas. Para esta función es necesario introducir el lapso transcurrido entre las series y el período de tiempo que se quiera predecir. El resultado de este modelo es una matriz de áreas de transición y un juego de imágenes de probabilidad condicional (Eastman, 2012).

Además existe una función que combina la teoría de autómatas celulares y las cadenas de Markov llamada CA_MARKOV, en este caso se usa una imagen de cobertura de uso de suelo como base para el modelo; además se carga la matriz de áreas de transición generada previamente con MARKOV, así como un conjunto de imágenes de aptitud de uso de suelo, se define el número de iteraciones que se desea realice el programa (usualmente es el número de años que transcurren hasta el escenario que se desea conocer) y si se desea usar algún tipo de filtro para los autómatas celulares. Este módulo arroja como resultado un conjunto de imágenes con la probabilidad de que un uso de suelo cambie o se mantenga en la categoría en la que se clasificó (Paegelow et al., 2003).

También por medio de una evaluación multicriterio, que está dentro del módulo soporte de decisión llamado MCE se puede hacer un análisis booleano, de combinación lineal ponderada, o de un promedio ponderado ordenado. Es necesario introducir las variables con las cuales trabajará el modelo en sistema binario y asignarles un factor de peso que describa la influencia de cada una de ellas; también se pueden introducir los parámetros restrictivos que se desea considere el modelo, el resultado será un raster de probabilidades de tipo binario en el caso del análisis booleano (Eastman, 2012).

1.2.7. Modelos de simulación de escenarios de crecimiento urbano

De acuerdo a la Real Academia Española un modelo es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja. Así, se debe entender que un modelo no proporciona información directa de lo que ocurre en la realidad. Dicho lo anterior las predicciones hechas por los modelos deben tomarse con cautela y no como un hecho irrefutable.

Existen varios modelos predictivos para generar escenarios futuros de cambios de uso del suelo, los cuales utilizan variables como la superficie de las actuales áreas urbanas, la infraestructura para el transporte, la distancia a los centros de trabajo, la oferta de bienes e insumos, las condiciones topográficas, la existencia de áreas dentro de alguna categoría de protección: como áreas naturales protegidas (ANP), parques nacionales y otros (Henríquez et al., 2006). Los modelos basados en transiciones espaciales utilizan métodos estocásticos como las matrices de Markov, los autómatas celulares y la evaluación multicriterio.

También hay modelos estadísticos para saber la correlación que existe entre diferentes variables y por lo tanto pueden determinar que tanto puede o no afectar una variable en otra, un ejemplo de estos modelos es la regresión logística.

1.2.7.1. Regresión logística (RL)

Es un modelo estadístico en el que se da a conocer la relación que existe entre una variable dependiente cualitativa, dicotómica (regresión logística binaria o binomial) o con más de dos valores (regresión logística multinomial) y las variables independientes, que se presumen relevantes, influyentes o explicativas (cualitativas o cuantitativas). Su objetivo principal es modelar cómo influye la probabilidad de que se dé un suceso por la presencia o no de diversos factores y el valor o nivel de los mismos. Por tanto el modelo expresa la probabilidad de que ocurra o no cierto evento. Su ecuación es de tipo exponencial como se muestra a continuación para el modelo de regresión logística binaria (Aguayo, 2007):

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{(-\alpha - \beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \beta_3 X_3 - \dots - \beta_k X_k)}} \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde

Y es la variable dependiente

X_1, X_2, \dots, X_k las variables explicativas

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los parámetros del modelo

e cuyo valor aproximado es 2.718, denota y genera la función exponencial

El propósito del análisis es predecir la probabilidad de que ocurra o no cierto evento, así como determinar que variables influyen más para aumentar o disminuir esa probabilidad. Cuanto más

coincidan los estados pronosticados con los estados reales, mejor ajustará el modelo; así, el mejor modelo es el que con menor número de variables, genere una predicción más precisa y válida de la respuesta evaluada.

Antes de llevar a cabo la regresión logística es necesario establecer: 1) cuáles podrían ser variables realmente predictoras de la respuesta dependiente; b) cuáles podrían ser variables confundentes; 3) cuáles podrían ser variables modificadoras de efecto o de interacción y 4) qué sentido tiene el análisis (Aguayo, 2007).

Para escoger las variables y descartar todo lo anterior es recomendable hacer un análisis bivalente entre cada una de las variables independientes y la variante dependiente. Si la variable independiente es categórica, se debe hacer una prueba chi cuadrada, comprobando la significancia estadística de la prueba. En caso de ser una variable cuantitativa, se hace por una prueba ANOVA o una t de Student, para comprobar si las medias son diferentes en los grupos que establece la variable dependiente. También se recomienda calcular el coeficiente de Spearman para verificar que las variables no sean redundantes entre sí (Aguayo, 2007).

Las variables cualitativas deben presentarse de manera dicotómica tomando valores de 0 y 1 (ausencia y presencia respectivamente), pero cuando tengan más de una categoría es necesario transformarlas a variables dummy, es decir, se forman varias covariables cualitativas dicotómicas, ficticias o de diseño de forma, ya que una de las categorías será tomada como referencia; lo anterior con el fin de poderlas incluir en el modelo.

Deben incluirse todas las variables que se consideren influyen en la variable dependiente, sin ser demasiadas, hay que tener en cuenta que entre mayor número de variables se consideren el error estándar será mayor. Una vez seleccionadas las variables que se utilizarán en el modelo se forma el modelo inicial, que se reduce hasta llegar a la versión mínima que explique mejor los datos.

Puede realizarse por métodos de selección por pasos, ya sea hacia delante (inicia con una sola variable y se van agregando más, empezando por aquellas que tienen coeficientes de regresión más grandes, estadísticamente significativos) o hacia atrás (comienza con todas las variables y va eliminando las que sean menos significativas). También se puede usar el método "introducir" el cual permite que el investigador decida que variables incluir o no en el modelo. Como resultado del modelo se obtiene la significancia global, que se realiza por pruebas de ajuste del modelo, entre mayor sea la significancia, el ajuste será mejor (Aguayo, 2007).

Los cálculos del modelo se hacen a través del método de máxima verosimilitud, es decir, estimaciones que hagan máxima la probabilidad de obtener los valores de la variable dependiente de acuerdo a los datos de la muestra. Puesto que es un valor muy pequeño, se suele usar el logaritmo neperiano de la verosimilitud, que es un número negativo o menos dos veces el logaritmo neperiano de la verosimilitud (-2LL), que es un número positivo. Es un estadístico que sigue una distribución similar a χ^2 comparando los valores de predicción con

los valores observados en dos momentos: uno, en el modelo sin variables independientes, sólo con la constante y otro, una vez introducidas las variables predictoras. El valor mide hasta qué punto el modelo se ajusta bien a los datos, es conocido como “desviación” y cuanto más pequeño sea el valor, mejor será el ajuste (Aguayo, 2007).

La capacidad predictiva del modelo se valora comparando el grupo de pertenencia observado y el pronosticado por el modelo.

El software SPSS tiene incorporado un módulo para realizar la regresión logística, algunos de los resultados que proporciona son: el valor de -2LL, y dos coeficientes de determinación (R^2), que expresa la proporción de la variación explicada por el modelo. Un modelo perfecto tendría un valor de -2LL muy pequeño (idealmente cero) y un R^2 cercano a 1 (idealmente uno).

Además, el programa muestra las variables que se considerarán en la ecuación, sus coeficientes de regresión con sus correspondientes errores estándar, el valor del estadístico de Wald para evaluar la hipótesis nula ($\beta_1 = 0$) y la significación asociada (Aguayo, 2007). Con estos datos, se construye la ecuación de la regresión logística (ecuación 1).

También expresa la bondad de ajuste global de Hosmer-Lemeshow, la cual construye una tabla de contingencia a la que aplica una prueba tipo chi cuadrado para evaluar el modelo. Parte de la idea de que si el ajuste es bueno, un valor alto de la probabilidad predicha (p) se asociará con el resultado 1 de la variable binomial dependiente, mientras que un valor bajo de p (próximo a cero) corresponderá con el resultado $Y=0$. Un modelo se puede considerar aceptable si la especificidad y la sensibilidad tienen un nivel alto, de al menos el 75% (De la Fuente, 2011).

Según Llaugel y Fernández (2011) se considera como ventaja del modelo que si la variable de respuesta es binaria se cumplan las siguientes premisas:

- a) La media condicional de la ecuación de regresión debe ser formulada para estar contenida entre 0 y 1.
- b) La distribución binomial y no la normal, describe la distribución en la que estará sustentado el análisis.
- c) Los principios que guían el análisis de regresión lineal, son los mismos para el análisis de regresión logística.

Algunas de las ventajas de la regresión logística es que se pueden hacer predicciones desde un conjunto de variables continuas, discretas, discontinuas, cuantitativas y categóricas o una mezcla (Quintana et al. 2011).

Otra ventaja de este modelo es que no requiere supuestos de normalidad en los datos y homoscedasticidad (la varianza de los errores es constante) (Amuzurrutia-Valenzuela et al., 2015).

A continuación se citan algunos estudios donde se utiliza la regresión logística como parte de la metodología para pronosticar el crecimiento urbano:

- Pineda et al. (2009) construyeron un modelo de regresión logística para conocer la pérdida de bosque en el Estado de México. Las variables independientes fueron: distancias a zonas agrícolas, a localidades marginadas, a zonas urbanas y a carreteras, pendiente en grados, altitud, precipitación y fragilidad ecológica. De 1993 al 2002 los asentamientos humanos ganaron 7,792 ha y la superficie boscosa se redujo de 624,498 a 13,690 ha. La zona urbana ha crecido a costa de las áreas agrícolas (1,126 ha). En un período de 9 años el Estado de México perdió un total de 13,690 ha de cobertura de bosques. Las variables más relacionadas con la pérdida de bosques son la distancia a zonas agrícolas y la fragilidad ecológica.
- Batisani y Yarnal (2009) combinaron tres métodos de dispersión en un área metropolitana en Pensilvania: la tabulación cruzada para identificar las transiciones en el uso del suelo; la regresión logística para determinar las variables explicativas de uso de suelo urbano y el modelo regional CLUE-S para proyectar los patrones de uso urbano en el futuro en el condado. De acuerdo a la regresión logística determinaron que el suelo con aptitud agrícola está positivamente relacionado con la urbanización, en cambio la topografía tiene un efecto negativo sobre el suelo urbano.
- Gómez A. (2009) analizó la dinámica de transformación de la cobertura de suelo entre 1995 y 2006 en la localidad de Suba en Bogotá, mediante mapas de cobertura y regresión logística. Las variables explicativas más relevantes en el crecimiento urbano fueron: distancia a vías, perímetro urbano, zonas de inundación, pendiente y áreas protegidas.
- Arsanjani et al. (2013) investigaron la expansión urbana en el área metropolitana de Teherán, Irán. Por medio de un modelo híbrido que considera los métodos de regresión logística, cadenas de Markov y autómatas celulares. Por medio de variables ambientales y socioeconómicas se calibró el modelo usando los datos de 2006. Se predijeron escenarios para 2016 y 2026 con altas probabilidades de desarrollo urbano en las cercanías de la frontera occidental de la metrópoli de Teherán.
- Amuzurrutia-Valenzuela et al. (2015) evaluaron la susceptibilidad de urbanización en la zona metropolitana de San Luis Potosí en México, desarrollando un modelo de regresión logística basado en las variables explicativas generadas a partir de imágenes de satélite Landsat (1999 y 2009) e información geoespacial. Determinaron que la distancia a zona industrial, la elevación y el costo del uso del suelo tuvieron mayor influencia sobre el crecimiento urbano.

I.2.7.2. Cadenas de Markov

Las cadenas de Markov se utilizan para estimar las probabilidades de que un uso de suelo determinado cambie en un periodo dado a otro uso de suelo (Paegelow et al., 2003) este modelo asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Las cadenas de Markov son una herramienta para analizar el comportamiento de determinados procesos estocásticos. Una cadena de Markov, por tanto, representa un sistema que varía su estado a lo largo del tiempo, cada cambio es una transición del sistema. Dichos cambios no están predeterminados, aunque sí lo está la probabilidad del próximo estado en función de los estados anteriores, probabilidad que es constante a lo largo del tiempo (sistema homogéneo en el tiempo). Eventualmente, en una transición, el nuevo estado puede ser el mismo que el anterior y es posible que exista la posibilidad de influir en las probabilidades de transición actuando adecuadamente sobre el sistema (decisión). Cabe mencionar que el número de estados del sistema es finito; fue utilizado por Muller y Middleton en 1994 para hacer comparaciones cuantitativas de los cambios de uso del suelo de 1935 a 1981 en la región del Niágara, concluyendo que la sustitución de uso de suelo agrícola por suelo urbano es rápida, asimismo el área con cobertura boscosa se mantuvo constante.

A partir del empleo de la teoría de Markov, la probabilidad de que un sistema se encuentre en uno de una serie de k estados en un tiempo t_2 se puede predecir considerando el estado del sistema en el tiempo t_1 , lo anterior sin considerar en lo absoluto la historia del sistema. Para llevar a cabo esta predicción, es necesario construir la Matriz de probabilidades de transición, nombrada simplemente como Matriz de Transición (MT).

Tabla 4. Ejemplo de matriz de transición que simula las probabilidades de cambio de uso de suelo.

	URBANO	BOSQUE	CULTIVO	PASTIZAL
URBANO	0.9	0.6	0.4	0.5
BOSQUE	0.7	0.6	0.7	0.6
CULTIVO	0.5	0.5	0.8	0.3
PASTIZAL	0.8	0.9	0.9	0.9

La modelización se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema. Es un procedimiento discreto en tiempos discretos.

El módulo MARKOV del software IDRISI, usa como datos de entrada dos mapas de distintos años que se suceden cronológicamente con la distribución del uso de suelo particular de cada año. Con esta información cargada al módulo, el programa generará como datos de salida una matriz de transición, la cual expresa la probabilidad de que una determinada área con un uso de suelo particular, cambie a otro uso de suelo permitido. Junto con la MT, IDRISI genera una matriz de áreas de transición, la cual expresa la predicción del área total (número de píxeles) que cambiará de uso de suelo en el siguiente periodo. Finalmente, generará una serie de

imágenes (una por cada categoría) que indican la probabilidad de que cada área en la zona estudiada adquiriera en el siguiente periodo de tiempo un determinado uso de suelo. Para ello, se debe considerar el número de unidades temporales (usualmente años, que define el número de iteraciones) transcurridos entre t_1 y t_2 y entre esta última fecha y la que se pretende modelar (t_3) asumiendo una evolución lineal (Paegelow et al., 2003).

Para usar este módulo es necesario que los mapas cuenten con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la aparición o desaparición de una de las categorías impide aplicar el método (Paegelow et al., 2003).

Este algoritmo se basa en la probabilidad de aptitud de uso de cada categoría que supere una repartición aleatoria, así le atribuye a cada pixel una de las categorías consideradas según la aptitud más adecuada. Por lo tanto se obtienen imágenes con un efecto “tipo confeti”, aunque las grandes tendencias son visibles. Para eliminar este efecto, es necesario la aplicación de otros módulos que permitan la integración del factor de vecindad, como ST_CHOICE, que evalúa la probabilidad de cada pixel de pertenecer a una u otra categoría y configura un mapa único (Paegelow et al., 2003).

Los siguientes estudios han utilizado el método de cadenas de Markov para elaborar modelos de crecimiento urbano:

- López et al. (2001) por medio de cadenas de Markov y regresión lineal exploraron la relación entre crecimiento urbano y cambio de paisaje y entre crecimiento urbano y crecimiento de la población en la Ciudad de Morelia. Encontraron que los pastizales y matorrales son las categorías menos estables. Además establecieron que las cadenas de Markov ayudan más en la descripción de los cambios de uso de suelo y no en la predicción, para esto sugieren el uso de la regresión lineal para conocer las tendencias de crecimiento dentro de las ciudades.
- Henríquez et al. (2006) usaron un modelo de transición espacial basado en las técnicas estocásticas de método de cadenas de Markov y autómatas celulares en la ciudad de Chillán, Chile. Por medio del Modelo de Simulación Simultanea de uso/cobertura de suelo (MSSCUS) para evaluar los impactos ambientales de la dinámica espacial urbana y sus implicaciones en la planificación territorial. Encontraron que el modelo entrega una representación razonable del probable cambio de uso de suelo urbano.
- Guan et al. (2011) modelaron el crecimiento urbano de la Ciudad de Saga en Japón. Por medio de SIG, específicamente utilizando la teoría de cadenas de Markov y autómatas celulares. Pronosticaron para el período de 2015-2042, que las tierras ocupadas por bosques y cultivos tienen una tendencia a la baja, en cambio las zonas urbanizadas a la alta. El estudio pretende proveer a las autoridades locales de datos, para equilibrar mejor la expansión urbana y la conservación ecológica.

I.2.7.3. Autómatas celulares (CA)

El modelamiento del crecimiento urbano a través de autómatas celulares ha sido utilizado por diferentes autores. La teoría de los autómatas celulares se inicia con su precursor John von Neumann a finales de la década de 1940 con su libro *Theory of Self-reproducing Automata*.

Un autómata celular (CA) es un sistema dinámico formado por un conjunto de elementos sencillos idénticos entre sí, pero que en conjunto son capaces de demostrar comportamientos complejos (Wolfram, 1984).

Dentro de la estructura de un CA se pueden definir cinco componentes básicos:

Teselación homogénea.- es un plano bidimensional o un espacio n-dimensional dividido en un número de subespacios homogéneos (celdas). En SIG esta teselación es bidimensional y hace referencia a la malla raster empleada.

Estado de la celda.- cada estado de la celda es representado por una variable espacial y puede estar en un conjunto finito de estados.

Un reloj virtual de tiempo.- determina el tiempo en que debe aplicarse la regla de evolución para el cambio de estado, en SIG se habla de iteraciones.

Reglas de evolución.- éstas guían la dinámica de la evolución del sistema y define el estado antes y después de cada celda, dependiendo del estado inmediato anterior de la celda vecina.

Vecinos.- se define para cada celda, un conjunto contiguo de celda; en una dimensión tendría dos vecinos. Esta vecindad puede estar formada por las celdas inmediatamente contiguas a la celda en cuestión (figura 1) (Singh, 2003).

En 1994 el geógrafo Ron Eastman desarrolló el software llamado IDRISI, posteriormente se cambió el nombre del desarrollador a Laboratorios Clark que ofrece una suite amplia de software. Dentro del módulo CA_MARKOV de IDRISI se combina el método de las cadenas de Markov y los autómatas celulares, esto últimos funcionan como un agente u objeto que tiene la habilidad de cambiar su estado. Es un sistema dinámico discreto que se desarrolla en el espacio y tiempo, compuesto por celdas, cuadrícula, vecinos y reglas. Las celdas son el elemento básico de los autómatas celulares, las cuales pueden tener estados binarios 1 o 0; la cuadrícula es la disposición de esas celdas en una red espacial en una o dos dimensiones; los vecinos son las celdas que determinan el estado de una celda (figura 1) y las reglas, definen el estado de la celda para el próximo período (Eastman, 2003).

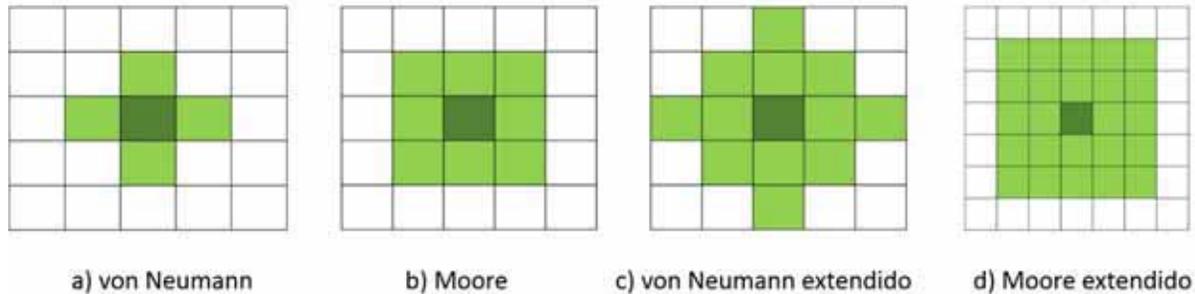


Figura 1. Tipos de vecinos de autómeta celular.

Fuente: tomado de Henríquez et al., 2006.

El módulo CA_MARKOV integra la matriz de transición que se genera por medio de cadenas de Markov y los mapas de aptitud (imágenes en las cuales se diferencian las zonas más aptas de las menos aptas de acuerdo a un criterio establecido previamente), con ello asigna a cada pixel una categoría de uso de suelo en la fecha proyectada. Este método tiene la ventaja de considerar las variables ambientales o socioeconómicas que el investigador considere influyen en el cambio de categoría de uso de suelo y no solamente en los cambios cronológicos de las cadenas de Markov. Además se integra un algoritmo de automatismo celular con un filtro booleano de 5*5 (figura 1, c) que mide la contigüidad local, así los pixeles que estén dentro de este filtro tomaran el valor de la categoría central, incrementando con ello la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad (Eastman, 2003). Con ello se elimina el efecto tipo confeti que se observa en los mapas obtenidos con cadenas de Markov (Paegelow et al., 2003).

Es necesario indicar el número de iteraciones con el que trabajará el modelo, estas establecerán el número de pasos de tiempo que se utilizaran en la simulación. El número de años transcurridos entre el mapa en t_2 y el que se desea proyectar (t_3) será el número de iteraciones con las que trabajará el modelo, así la última iteración será la fecha de predicción futura deseada (Eastman, 2003).

Algunas ventajas de usar estos modelos son: su manejabilidad, capacidad de simular bien los procesos tradicionales de cambio basados en la difusión y fenómenos dinámicos y deterministas no lineales. Han sido empleados para la representación de procesos urbanos desde un enfoque de “abajo arriba” y que simulen las ciudades como un conjunto de elementos que actúan como células que crecen y cambian (Aguilera, 2006).

Aguilera (2006), menciona las siguientes ventajas de estos modelos:

- a) Son inherentemente espaciales, ya que están definidos por una malla raster y son compatibles con datos geográficos existentes
- b) Son dinámicos y pueden representar procesos espaciales de manera directa
- c) Son adaptables a un amplio rango de situaciones
- d) Son simples, su cálculo es fácil

- e) Están basados en conjunto de reglas, que pueden reflejar varios comportamientos espaciales
- f) A pesar de su simplicidad pueden exhibir comportamientos muy complejos

A continuación se presentan algunas investigaciones que usaron la teoría de autómatas celulares para conocer las probabilidades de crecimiento de la zona urbana:

- Singh (2003) desarrolló un modelo por medio de autómatas celulares que fusionó diversos procesos que predijeron el cambio de cobertura y uso de suelo en Shimla, India. Concluye que en este caso, la información del uso de suelo que tienen las células vecinas no determinan por completo la probabilidad de cambio. Es necesario tomar en cuenta otros factores.
- Paegelow et al. (2003) presentan los resultados al aplicar un método prospectivo que combina las cadenas de Markov en relación con un conjunto de variables explicativas (MCE) para asignar a cada pixel una categoría de ocupación de suelo (MOLA) y complementado por un algoritmo de automatismo celular en la Alta Alpujarra y en los Garrotxes. La proyección de las dinámicas paisajísticas en estas ciudades les permitió evaluar y precisar aportaciones y límites de dichas metodologías.
- Henríquez et al. (2006) evaluaron y simularon el cambio en el coeficiente de escorrentía superficial para la ciudad de Los Ángeles y sus alrededores por medio de SIG, software IDRISI Kilimanjaro, integrando los métodos de cadenas de Markov, evaluación multicriterio y autómatas celulares. Concluyen que esta herramienta es de gran utilidad para hacer análisis espaciales de impacto ambiental y que en este caso es importante hacer un plan de ordenamiento territorial.
- Aguilera (2006) construyó dos modelos para predecir el crecimiento urbano del Área Metropolitana de Granada, uno basado en regresión logística y otro en autómatas celulares. Los resultados con mayor fiabilidad fueron los obtenidos por el modelo de autómatas celulares, este modelo se empleó para hacer un pronóstico a 2014.
- Sandoval en 2009 estudió las tendencias espaciales de crecimiento y la simulación de escenarios futuros de ocupación del territorio de Gran Valparaíso por medio del módulo CA_MARKOV de IDRISI, análisis multicriterio e imágenes de aptitud, concluyen que el proceso de expansión urbana continuará aun siguiendo el Plan Regulador Metropolitano, pero será mayor en las ciudades costeras.
- Moghadam y Helbich (2013) utilizaron un modelo de crecimiento urbano en base a las cadenas de Markov y los autómatas celulares, para hacer un pronóstico de expansión de la Ciudad de Mumbai para los años 2020 y 2030. La tasa de cambio mayor (142%) ocurrió entre los años 1973 y 1990. Las zonas más afectadas eran tierras abiertas y campos de cultivo. Se pronostica un crecimiento del 26% para 2020 y de 12% para 2030.

- Akin et al. (2015) analizaron el cambio de uso de suelo a urbano en Estambul y evaluaron el crecimiento al año 2040 por medio de modelos basados en cadenas de Markov, autómatas celulares y regresión logística. La distancia a zonas urbanas, a carreteras, la elevación y la pendiente fueron los factores identificados como influyentes en el cambio. Los resultados indican que la expansión urbana será sobre las áreas forestales y crecerá de 327 a 429 km² de acuerdo al modelo de cadenas de Markov y regresión logística respectivamente.

I.2.7.4. Análisis multicriterio (MCE)

La evaluación multicriterio es un conjunto de técnicas que apoyan los procesos de toma de decisiones, en la cual se combina un conjunto de criterios para tomar una decisión de acuerdo a un objetivo específico. A través de un conjunto de imágenes que contengan los criterios que deben seguirse para que una zona sea apta para cierta actividad (ejemplo: desarrollo industrial) estos se combinan y generan una sola imagen que contiene todos esos criterios para formar un mapa donde puedan elegirse las zonas más aptas.

Un criterio es cierta base para la toma de una decisión, esta base puede ser medida y evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión. Hay de dos tipos: los factores y las limitantes. Un factor es un criterio que realza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste por lo tanto debe ser medido en una escala continua. En cambio el criterio tipo limitante restringe la disponibilidad de algunas alternativas en función de la actividad evaluada, excluyendo varias categorías de la capa analizada para la evaluación, se genera una capa binaria donde cero representa los sitios no disponibles para la actividad evaluada y uno donde si (Gómez y Barredo 2005).

Es necesario preparar las capas de las diferentes variables bajo criterios para que puedan ser utilizados en la evaluación. Es preciso contar con una regla de decisión para escoger la mejor alternativa, así entonces la evaluación es el proceso por medio del cual se aplica la regla de decisión sobre las capas-criterio. La regla de decisión incluye el procedimiento para llevar a cabo la MCE, así como para actuar sobre los resultados de la evaluación (Gómez y Barredo 2005).

Para poder hacer la comparación entre los criterios y las alternativas, se debe formar una matriz, conocida como matriz de evaluación. Sus valores internos son llamados puntuaciones de criterios. Una vez establecida la matriz, es posible determinar el llamado punto ideal, éste es un vector que combina los valores más altos de cada criterio. El punto ideal es utilizado para el cálculo de la distancia entre el óptimo deseable y cada una de las alternativas, de esta manera las distancias más cercanas al punto ideal serán las mejores para la actividad evaluada (Gómez y Barredo 2005).

Los criterios deben tener un valor específico de acuerdo a su nivel de importancia relativa, esto recibe el nombre de peso o ponderación.

Una de las técnicas utilizadas para la ponderación de los criterios es la comparación por pares de Saaty, en la cual se construye una matriz cuadrada con los factores a ponderar, para que de esta forma se pueda hacer una comparación entre pares de factores, definiendo la importancia de uno sobre cada uno de los demás. Después de esto se calcula el eigenvector principal, el cual establece los pesos y el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa del juicio de valor entre pares de factores, la diagonal de la matriz tiene valores de uno, puesto que la comparación de cada factor consigo mismo es igual. La matriz que se produce es recíproca, es decir los valores a ambos lados de la diagonal son inversos. Los juicios de valor están definidos de 1/9 hasta 9 de la siguiente manera:

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte Menos importante	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte	Extrema	Más importante	

Figura 2. Escala de medida según Saaty.

Los juicios de valor son asignados por un grupo de expertos en el tema a evaluar, al ser una decisión humana, esta contiene un grado de incertidumbre y subjetividad. El cálculo del eigenvalor máximo, permite conocer el grado de consistencia en la asignación de los juicios de valor (Gómez y Barredo 2005).

La razón de consistencia se establece a partir del cociente entre el valor del índice de consistencia y el índice aleatorio. Los juicios de valor deben ser reconsiderados si los valores de la razón de consistencia son mayores o iguales a 0.10.

En IDRISI el módulo WEIGHT, sirve para calcular el vector propio principal directamente, en el cual se introduce la matriz de comparación.

Hay que normalizar los factores, esto se obtiene a partir del cociente entre cada valor y el valor de la sumatoria de cada columna, los valores normalizados se suman por fila obteniendo el eigenvector principal, se normaliza, dividiendo cada uno de los valores de dicho vector entre n obteniendo el eigenvector principal normalizado que representa los pesos de cada factor.

Es necesaria la normalización para evitar soluciones sesgadas hacia las variables que alcancen los valores más altos. El módulo FUZZY (difuso) en IDRISI, sirve para la estandarización de factores usando un rango completo de funciones de pertenencia de grupos difusos. Puede hacerse en escala de números reales (0 a 1) o escala byte (0 a 255). El valor más alto de la escala estandarizada debe representar el caso de mayor probabilidad de pertenencia al grupo de decisiones (Gómez y Barredo 2005).

Existen tres distintos métodos para realizar la MCE, los cuales se diferencian por los procedimientos aritméticos y estadísticos que se realizan sobre las matrices de evaluación y de prioridades.

El módulo MCE de IDRISI puede trabajar con cualquiera de los tres métodos que se describen a continuación:

Intersección booleana: se considera que todos los criterios son limitaciones y el resultado es su intersección, no existe compensación entre los criterios, tiene un riesgo bajo de tomar mal la decisión ya que sólo considera las zonas que son adecuadas en todos los criterios. Este método sólo se usa cuando los mapas de factores han sido estrictamente clasificados en imágenes booleanas (adecuados/no adecuados) con valores de 0 y 1. La evaluación es la multiplicación de todas las imágenes.

Combinación lineal ponderada: este método puede incluir factores ponderados y limitaciones, multiplica cada factor por su peso y luego estos resultados se multiplican por cero en las zonas restrictivas. Hay equilibrio entre los factores y el riesgo, así como compensación entre criterios. Es necesario especificar el número de criterios (tanto factores como restricciones), sus nombres y pesos. Todos los factores deben estar estandarizados en bytes. El resultado es un mapa de adecuación enmascarado por las restricciones especificadas. El factor con mayor peso tiene mayor influencia en la construcción del mapa de adecuación final, tiene un riesgo medio.

Promedio ponderado: este método incluye factores ponderados, limitaciones y pesos de orden, que sirven para controlar directamente los niveles de compensación y riesgo, en este caso los pesos son asignados de acuerdo a su posición (pixel). Controla la manera en la cual los factores ponderados son agregados.

El resultado final será un mapa de aptitud en formato byte binario con valores de 1 a 0 en el caso de intersección binaria o en el rango de los mapas del factor en los otros métodos (Eastman, 2012).

Voogd (1983) plantea una serie de ventajas y desventajas de la MCE.

Entre las ventajas más importantes se tiene que:

- Permiten obtener una clasificación examinable de información objetiva.
- Proporcionan un medio para obtener un mejor conocimiento de las repercusiones de los juicios de valor.
- Se pueden integrar los diferentes enfoques en torno a un problema a evaluar.
- Ofrecen en una forma sintética y resumida las características principales de la información disponible acerca de un problema

- Ayudan a tomar decisiones basadas en un principio de multidimensionalidad de criterios y puntos de vista.
- Proveen una justificación para las decisiones políticas, económicas, ambientales o sociales que toma un centro decisor.

Sin embargo esta metodología también presenta algunas desventajas como son:

- La mayoría de los métodos de MCE, sólo pueden evaluar un número pequeño de alternativas sobre un número limitado de criterios.
- El uso de la MCE requiere tener ciertos conocimientos previos, por lo que algunas de las personas que se involucren en el estudio, pudieran tener dificultad para aplicarlo.

Algunos autores han basado sus investigaciones en este tipo de análisis para simular dinámicas de crecimiento urbano, como los siguientes:

- Molero et al. (2007) utilizando la MCE por la técnica de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se pretendía localizar las zonas más aptas para acoger nuevos crecimientos urbanos en la provincia de Granada. Se utilizaron como factores la accesibilidad a los nudos, a entornos urbanos, usos del suelo, orientación, amplitud visual al mar.
- Pineda et al. (2009) describieron los cambios en la cobertura y uso de suelo sucedidos en el Estado de México en el período de 1993-2002. Por medio de métodos de regresión multivariable, con ello demostraron que la categoría de bosques tienen cambios netos bajos, pero valores de intercambio altos. El principal factor que influye en estos cambios son los valores demográficos a nivel municipal. Las zonas con alta fragilidad ecológica son las más susceptibles a ser deforestadas.
- Plata W. (2010) por medio de evaluación multicriterio describió, analizó y simuló las dinámicas urbanas pasadas y futuras de la comunidad de Madrid. Entre 1990 y 2000 se dio un crecimiento desmesurado de la urbe, principalmente sobre zonas agrícolas y forestales. Algunas características espaciales como: accesibilidad a las carreteras, altitud del terreno, y la pendiente, entre otras, favorecieron el crecimiento urbano. Se construyeron tres escenarios: tendencia, crisis y de innovación y sostenibilidad.
- Rosa et al. (2010) realizaron una simulación para un escenario de crecimiento urbano óptimo para 2020 en Granada, que permitiera localizar los nuevos usos residenciales, comerciales, e industriales. Se utilizaron 13 factores uso del suelo, vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, proximidad a espacios naturales y a la red hidrográfica, pendiente, proximidad a zonas urbanas, industriales y comerciales, accesibilidad a carreteras, litología, cuencas visuales, orientación del terreno, proximidad a instalaciones no deseables, a hospitales y universidades, en dos intervalos de tiempo.

La proyección hecha para 2000-2010 y 2010-2020 fue la que ofreció la aptitud de suelo más coherente de acuerdo a los objetivos planteados.

- Henriquez y Qüense (2010) por medio de MCE y evaluación multiobjetivo determinaron las zonas más aptas para cuatro usos representativos: espacios de conservación, plantaciones forestales, usos agrícolas y áreas de expansión urbana, de la cuenca del río Chillán. Sus resultados prevén ciertos conflictos entre los suelos con alta prioridad agrícola y con la expansión urbana de la Ciudad de Chillán.
- García en 2012 utilizó las técnicas de evaluación multicriterio y SIG para definir áreas aptas para el cultivo de maíz y de frijol en la subcuenca de San Pedro Bajo Mezquital en los estados de Durango y Nayarit. Los resultados arrojaron que el cultivo de frijol es más apto que el del maíz. Los expertos señalaron que las variables más importantes son la pendiente y el período de crecimiento. Este estudio muestra cómo debe realizarse la ponderación de variables con un grupo interdisciplinario.
- Gómez et al. (2014) analizaron los resultados obtenidos para la simulación de crecimiento urbano, entre los años de 2000 y 2020 en la comunidad de Madrid aplicando dos modelos diferentes, uno basado en autómatas celulares y otra en técnicas de evaluación multicriterio. No encontraron coincidencias entre los resultados de un modelo y el otro. Sólo para el caso del uso residencial encontraron que el escenario obtenido marca una tendencia de mayor crecimiento de los usos urbanos. Concluyen que cada modelo implica procedimientos diferentes, con requerimientos técnicos distintos.
- Da Silva y Cardozo (2015) por medio de técnicas de análisis multicriterio identificaron los espacios potenciales para la ocupación residencial en la ciudad de Resistencia que es la capital de la Provincia del Chaco en Argentina. Los resultados mostraron una buena capacidad del oeste y noroeste de la ciudad. Utilizaron como factores la altitud y la pendiente, distancia a los ríos Paraná y Negro, las coberturas de suelo, distancia a áreas ya urbanizadas, a la red vial y a las paradas de los colectivos, así como a los establecimientos educativos y centros de salud.

Asimismo, la validación de los modelos obtenidos por los métodos anteriores se puede hacer por medio de una comparación con datos existentes para la zona que se desea pronosticar. Un índice para validar dicha comparación es el coeficiente de Kappa que corresponde a la proporción de concordancias observadas sobre el total de observaciones, habiendo excluido las concordancias atribuibles al azar. Toma valores entre -1 y +1, mientras más cercano esté a +1 mayor será el grado de concordancia, en cambio un valor de 0 indica que la concordancia se debe al azar (Cerdeira y Villarreal, 2008).

Otro indicador de la bondad de ajuste de los modelos es el parámetro estadístico ROC (Relative Operating Characteristic), este indicador mide la exactitud de la predicción del modelo y toma

valores en un rango de 0.5 a 1. Entre más se acerque el valor a 1 el ajuste del modelo es mejor (Amuzurrutia-Valenzuela et al. 2015).

I.2.8. Trabajos en la zona de estudio

- En 1987 Benítez et al. realizaron una evaluación comparativa de los usos de suelo y pérdida de la cubierta vegetal entre 1959 (escala 1:50 000) y 1977 (escala 1:30 000) con fotografías aéreas de la Sierra del Ajusco, concluyendo que el proceso de urbanización como consecuencia del crecimiento de la población, influyó en la vegetación y uso de suelo provocando cambios en la superficie y distribución. En 1977, el área urbana fue 4.3 veces mayor que en 1959.
- López y Plata (2009) realizaron un estudio de los cambios de cobertura de suelo ocurridos durante la década de 1990 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Por medio de clasificación digital y visual de imágenes de satélite, SIG y análisis estadísticos encontraron que para el año 2000 el crecimiento de la extensión construida fue del 16%. En el área hubo 32 transiciones de uso de suelo, la zona urbana fue la que ganó territorio, las zonas agrícolas disminuyeron en un 20% y las zonas forestales se mantuvieron sin cambios fuertes con un 0.5% de ganancia.
- En el 2010 la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial PAOT realizó un análisis espacial de la zona de traslape entre dos instrumentos de planeación urbana y ambiental: el Programa General de Ordenamiento Ecológico para la Ciudad de México (PGOEDF) y los Programas Delegacionales de Desarrollo Urbano (PDDU). Se determinó que para la Delegación Tlalpan existe una superficie de traslape de 1,553 ha aproximadamente entre los dos programas analizados. Si bien la competencia en el ordenamiento ecológico del territorio en el Distrito Federal la tiene el gobierno de la Ciudad de México y la ordenación territorial urbana la tienen las Delegaciones Políticas a través de los PDDU, en este trabajo se pudo demostrar que no hay compatibilidad de competencias entre estos dos instrumentos jurídicos y de planeación, por lo que el uso de suelo puede o no cumplir con lo establecido en dichos programas.

CAPITULO II

II.1. Justificación

La Sierra del Ajusco se ubica en los límites de la Ciudad de México; al ser una zona con vegetación arbórea y pastizales ofrece un sinnúmero de servicios ambientales como recreación, filtración de contaminantes, recarga de acuíferos, producción de oxígeno y otros más. Además, dentro de la zona de estudio, se encuentran áreas naturales protegidas las cuales fueron declaradas en base a su riqueza de especies, importancia histórica y cultural, por las interacciones que se llevan a cabo en sus ecosistemas, entre otros.

Casi tres cuartas partes de la superficie del área de interés se encuentran sobre el suelo de conservación del Distrito Federal, que de acuerdo al PGOEDF debe de protegerse para darle continuidad a los procesos ecológicos y evolutivos que se llevan a cabo en los ecosistemas que allí se desarrollan.

Además, la zona tiene una importancia económica para los pobladores locales, puesto que hay zonas agrícolas y pecuarias, y en algunos de los parques nacionales, la población ofrece servicios ecoturísticos y de alimentación.

Los asentamientos humanos están ejerciendo una fuerte presión sobre el suelo de conservación, conforme estos se desarrollan, crece la demanda por bienes y servicios, los cuales han implicado fuertes cambios, principalmente en suelos con vocación agrícola o de pastizal.

La Ciudad de México, así como otras grandes urbes, ha tenido un crecimiento hacia la periferia de sus núcleos de población. Así, la ZMVM ha incorporado a su superficie varios municipios del Estado de México e Hidalgo.

Dentro de la zona de interés, ya existen programas de ordenamiento territorial, sin embargo, de acuerdo a estudios realizados por la Procuraduría Ambiental de Ordenamiento Territorial, los lineamientos establecidos en dichos programas no se cumplen en su totalidad y en ocasiones hasta se contraponen unos con otros. Lo anterior ha traído como consecuencia un crecimiento urbano sin control.

Derivado de lo anterior, es necesario tener un conocimiento amplio sobre los cambios de uso de suelo que se han dado en la zona de estudio en las últimas décadas. Principalmente saber que superficie ha cambiado a un uso urbano. Es importante además, tener un registro del tipo de cobertura sobre la cual se ha ejercido mayor presión por el crecimiento urbano.

Por medio de modelos estocásticos, se realizaran algunos pronósticos acerca del crecimiento de la mancha urbana. El fin de este tipo de estudios, es dar las bases para promover un desarrollo urbano planificado, respetando en todo momento los ecosistemas allí presentes.

II.2. Objetivos

II.2.1. General

Evaluar el cambio de uso de suelo en la Sierra del Ajusco desde la década de los setenta a la fecha por medio de SIG y el modelado de escenarios de crecimiento urbano por medio de tecnologías de información geográfica.

II.2.2. Específicos

- Determinar mediante el análisis geo-estadístico y geo-espacial los cambios de uso de suelo que se han dado desde la década de los setenta a la fecha en la Sierra del Ajusco.
- Conocer y cuantificar las superficies de vegetación natural que se han perdido o transformado por el crecimiento de la mancha urbana y actividades antropogénicas.
- Modelar un escenario de crecimiento urbano por medio de regresión logística para conocer las variables que tienen mayor influencia en el crecimiento urbano.
- Simular el crecimiento urbano a corto (2030) y mediano plazo (2045), de acuerdo a los cambios históricos que se han dado en la zona (cadenas de Markov).
- Pronosticar el crecimiento urbano a corto (2030) y mediano plazo (2045), en base a los cambios de uso de suelo que se han dado y a las variables que pudieran estarlo provocando (autómatas celulares).
- Validar los modelos de crecimiento urbano con un escenario ya conocido de la zona.
- Conocer las zonas con mejor aptitud para uso de suelo urbano de la zona, en base a ciertas variables (evaluación multicriterio).
- Comparar la aptitud de suelo que se asigna en los programas de ordenamiento territorial de la zona y la encontrada en este estudio.

II.3 Hipótesis

El análisis geo-estadístico de los cambios de uso de suelo que se ha dado en la Sierra del Ajusco, en complemento con el modelado de escenarios de crecimiento urbano, permite dar una visión del panorama futuro que podría presentarse en esta zona.

CAPITULO III

III.1. Materiales y métodos

III.1.1. Software, cartografía y equipo

Software	Versión	Licencia
IDRISI Selva	versión 17.1	CIIDIR Durango
Arc Map	versión 9	CIIDIR Durango
SPSS statistics	versión 17.0	CIIDIR Durango

Cartografía	Año de Publicación	Escala	Datum	Fuente de datos
Cartas de uso de suelo y vegetación Serie I, Serie II, Serie III, Serie IV y Serie V de la Ciudad de México (clave E1402)	1984 1997 2002 2010 2011	1: 250 000	UTM WGS 1984 Zona 14	INEGI
Modelos de elevación digital (MDE) de la zona metropolitana del Valle de México (claves E14A38, E14A39, E14A48 y E14A49)	2000	1:50 000	UTM ITRF92 Zona 14	
Conjunto topográfico de las cartas E14A38A, E14A38B, E14A39A, E14A39B, E14A39C, E14A39D, E14A39E, E14A39F, E14A49A, E14A49B, E14A49C, E14A49D, E14A49E y E14A49F	2009	1:20 000	UTM ITRF92	
Marco Geoestadístico (AGEB)	2014		Cónica Conforme de Lámbert ITRF92	
Carta Geológica que incluye fallas, fracturas, minas y rocas		1:1 000 000	North América Cónica Conforme de Lámbert, ITRF92	
Carta de la Región Hidrológica 12 y 18 y 26			WGS 1984 UTM Zona 14N	

Cartografía	Año de Publicación	Escala	Datum	Fuente de datos
Carta de Curvas de nivel para la República Mexicana		1: 250 000	WGS 1984	CONABIO
Carta de división municipal de la República Mexicana			UTM ITRF92	
Carta de climas de acuerdo a la clasificación hecha por Enriqueta García	1998	1:1 000 000	WGS84	CONABIO
Cartas de cuencas y subcuencas	2007	1:250 000	GCSWGS 1984	INEGI y CONAGUA
Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana	1998	1:4000 000	WGS84	INIFAP Y CONABIO
Carta de Áreas Naturales Protegidas de la República Mexicana	2014		UTM ITRF92	CONANP
Polígono de cada ANP			ITRF92	
Carta de las Unidades ambientales			WGS 1984	PGOEDF
Carta de las Áreas naturales protegidas del D.F			UTM Zona 14N	
Carta con los Asentamientos irregulares de las delegaciones Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan		1:10 000	UTM NAD 1927	PAOT
Riesgos geológicos e hidrometeorológicos	2010		WGS 1984 UTM Zona 14N	
Carta de ubicación geográfica de las denuncias PAOT	2010		WGS 1984 UTM Zona 14N	
Zonas inundables de la Cuenca de México	2003	1: 250,000	WGS 1984 UTM Zona 14N	Centro de Investigación en Geografía y Geomática
Unidades biofísicas del POEGT	2012	1: 1000 000	Cónica Conforme de Lámbert, ITRF92	SEMARNAT
Imagen de satélite LANDSAT8	diciembre 2014			GLOVIS, USGS

Equipo	Marca y modelo
Vehículo tipo sedan	Gol 2014
Receptor de GPS ESSENTIALS	Receptor de GPS ESSENTIALS
Cámara fotográfica	NIKON D5000
Binoculares	

III.1.2. Zona de estudio

III.1.2.1. Caracterización del área de estudio

La zona de estudio es la misma que se utilizó en el estudio hecho por Benítez et al. (1987) donde se compararon los usos de suelo en el periodo de 1959 a 1977, esta zona se delimita al Norte en las coordenadas geográficas 19° 20' LN y 99° 20' LW a 19° 20' LN y 99° 10' LW. Al sur 19° 10' LN y 99° 20' LW a 19° 10' LN y 99° 10' LW, con una superficie total de 32,302 ha.

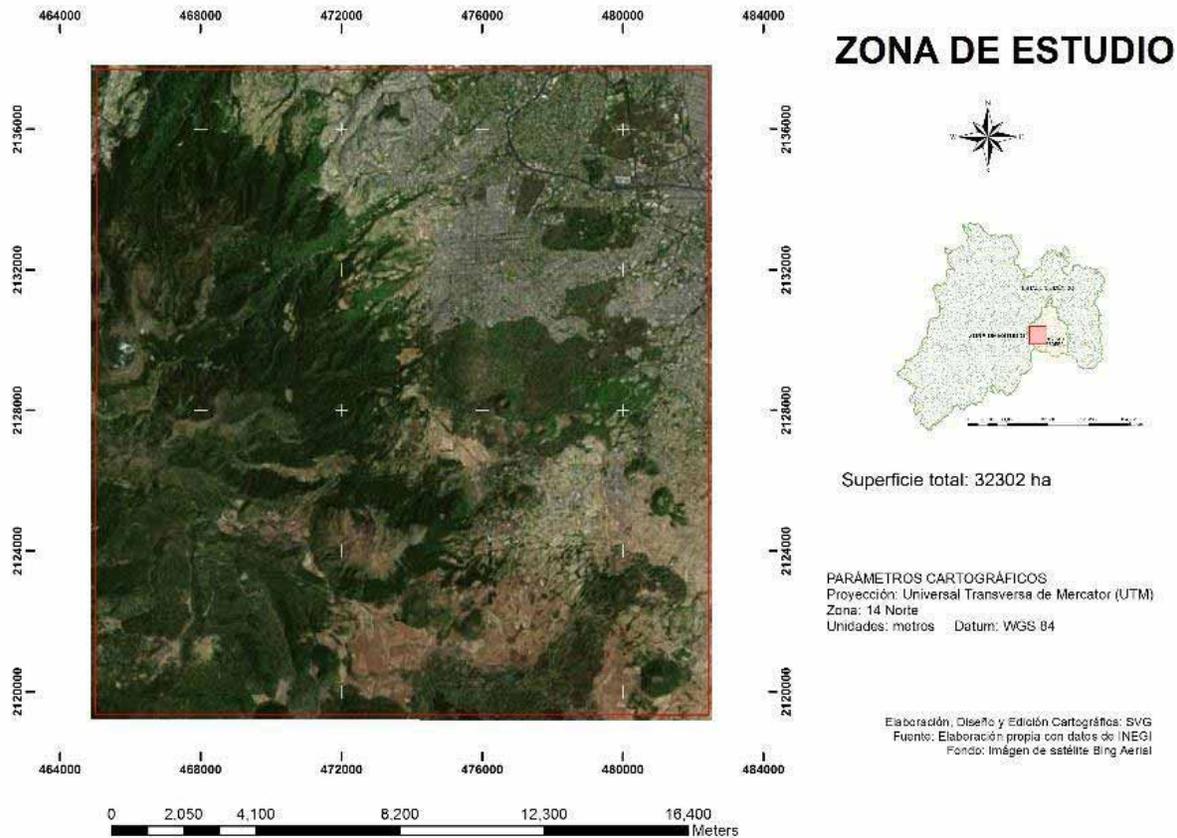


Figura 3. Área de estudio.

La zona se encuentra dentro de los límites políticos de 5 delegaciones (Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Coyoacán) y 2 municipios del Estado de México (Ocoyoacac y Xalatlaco).

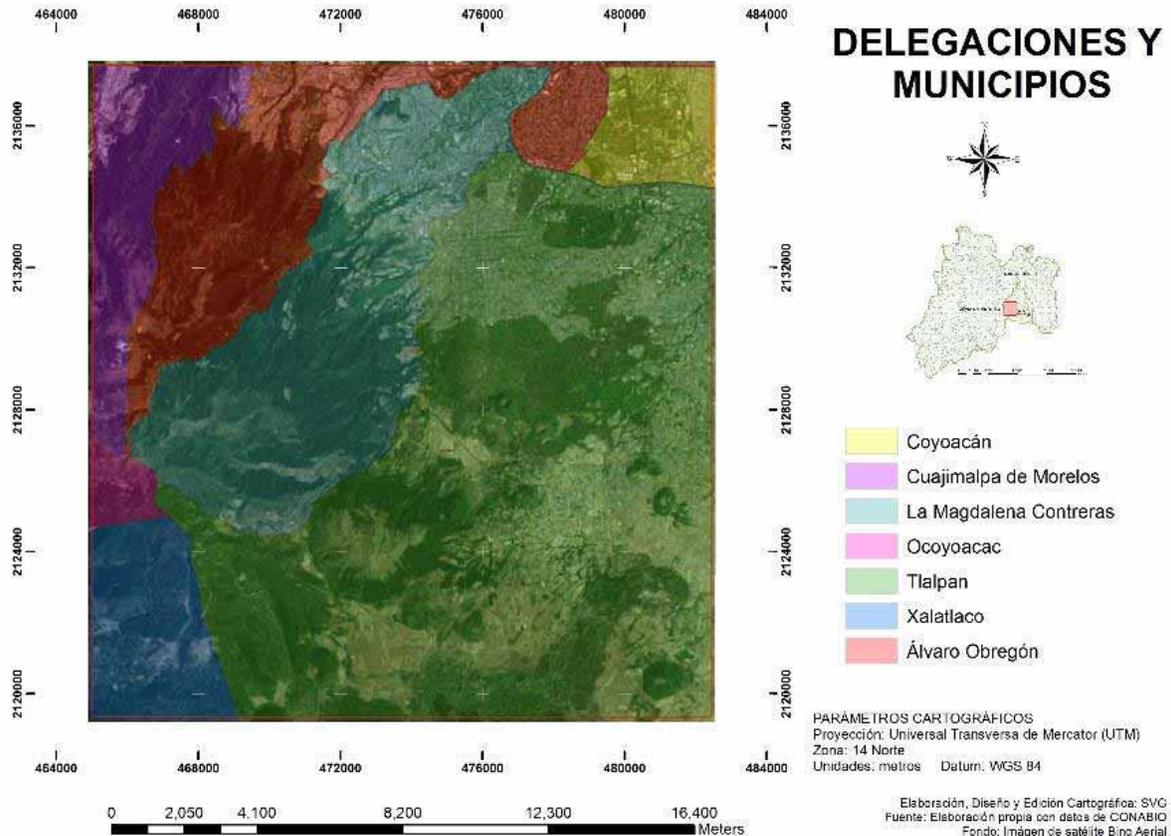


Figura 4. División política de las delegaciones y municipios.

Dentro de la zona de estudio se encuentran 5 áreas con decreto en el Diario Oficial de la Federación que son los Parques Nacionales: Desierto de los Leones, Lomas de Padierna, Fuentes Brotantes de Tlalpan, Cumbres del Ajusco e Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, no obstante, en el área también se ubican 2 reservas ecológicas comunitarias (San Nicolás Totolpan y San Miguel Topilejo) así como 2 zonas sujetas a conservación ecológica (Ecoguardas y Parque Ecológico de la Ciudad de México). Además el Gobierno Mexiquense por medio del Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas del Estado de México (SIEANPEM) estableció mediante decreto el Parque Estatal Otomí-Mexica al suroeste de la zona de estudio (Cartografía de CONANP, 2014).

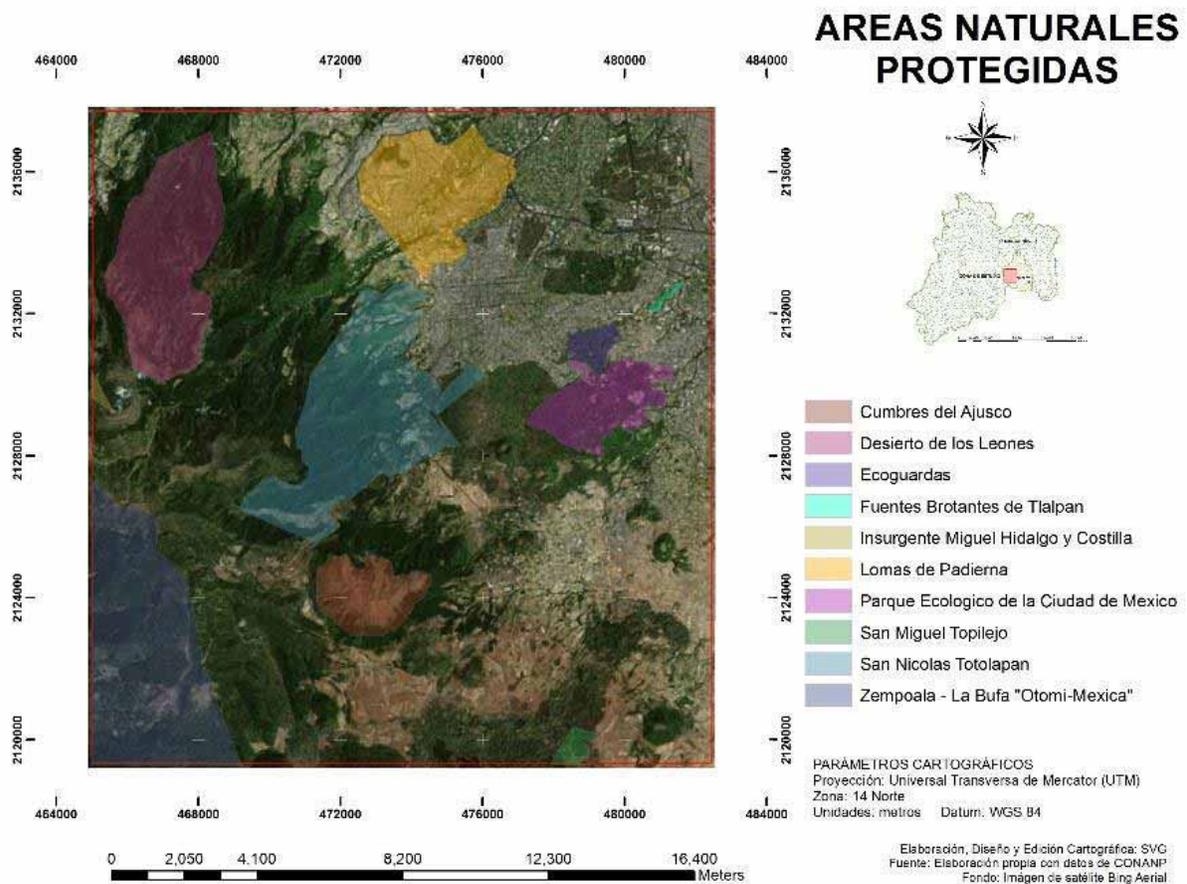


Figura 5. Áreas Naturales Protegidas de la zona de estudio.

La zona está dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal y está a una altitud de entre 2,400 y 3,800 msnm. Dentro de las principales elevaciones están el Cerro del Ajusco, el Cerro El Charco, el volcán del Xitle y otros dos volcanes sin actividad (Modelo de Elevación Digital de INEGI, 2000).



Figura 6. Modelo de elevación digital tomado de INEGI.

La zona se encuentra dentro de las cuencas del Valle de México, Lerma Chapala y Río Balsas, que son del tipo endorreicas; así mismo, está dentro de las Subcuencas del Río Almoloya-Otzolotepec, Río Apatlaco y Laguna Texcoco y Zumpango. Pertenece a las regiones hidrográficas del Pánuco, Lerma-Santiago y Balsas. En la zona suroeste hay una zona de recarga de acuíferos, hay corrientes de flujo intermitente y pequeños cuerpos de agua y estanques (Cartografía de INEGI y CONABIO, 2007).

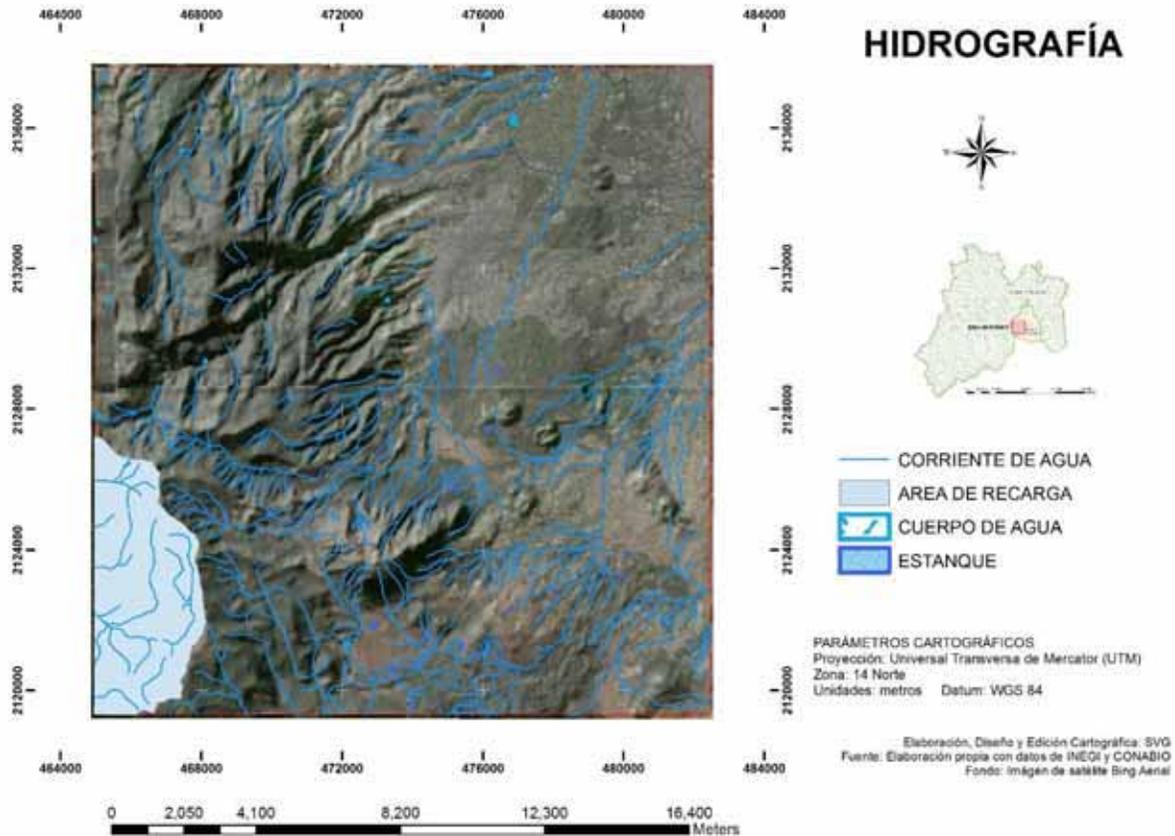


Figura 7. Hidrografía de la zona.

Predomina el tipo de clima Cb'(w2): semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18° C, temperatura del mes más caliente bajo 22° C con precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10% del total anual. También está presente el clima de tipo C(w2) que es templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C con precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice de la precipitación entre la temperatura (P/T) mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10% del total anual. El tipo de clima que hay en menor proporción es C(w1) que a diferencia del anterior, presenta lluvias de verano con índice P/T entre 43 y 55 (Cartografía de CONABIO, 1998).

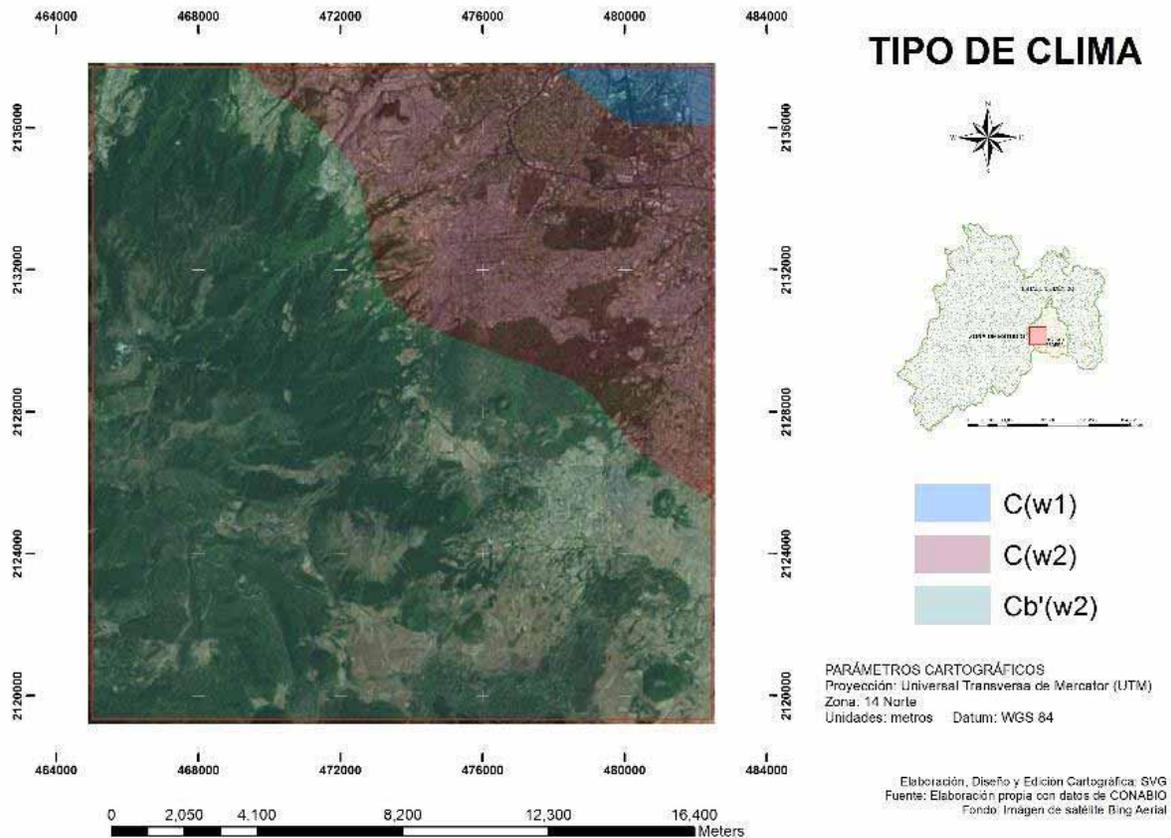


Figura 8. Tipo de clima.

Hay diferentes tipos de infraestructura vial en la zona, como vialidades, calles, caminos y carreteras, lamentablemente un porcentaje muy bajo se encuentra en operación y en condiciones de transitar, las calles en mejor estado son las que cruzan la zona urbana (Cartografía topográfica de INEGI, 2009).

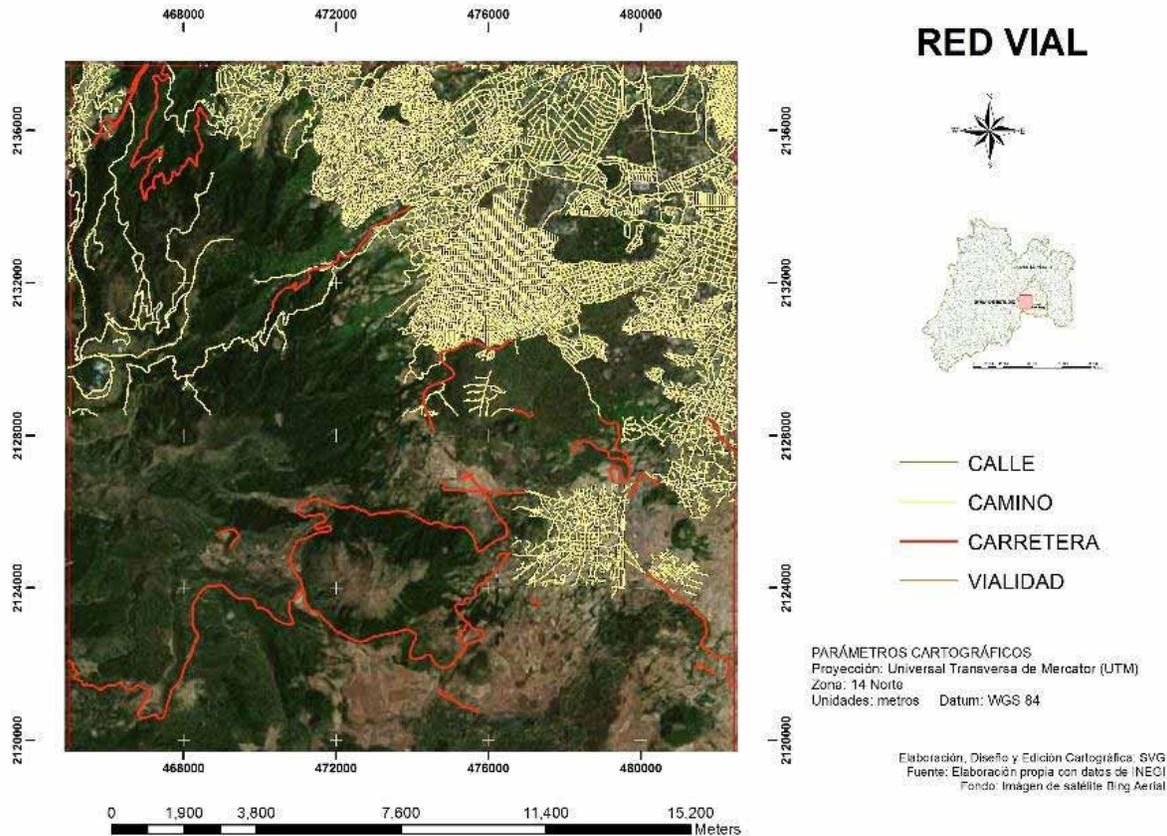


Figura 9. Red vía en la zona.

El Valle de México se separa de los Valles de Cuernavaca y Cuautla por la Sierra del Chichinautzin que está formada por un conjunto de pequeños volcanes. Entre ellos el volcán del Ajusco con la mayor altura (3,950 msnm) y el del Xitle (3,150 msnm) que hizo erupción hace muchos años, su lava descendió a lo largo de una distancia de aproximadamente 12 km por las laderas del Ajusco hasta llegar a las planicies del Valle de México dando origen a las formaciones de roca en algunas colonias de la Delegación Tlalpan, Álvaro Obregón y Coyoacán (Siebe, 2005). Así tenemos 3 tipos de roca: volcanoclástica, ígnea extrusiva básica e intermedia. La zona se encuentra en la placa Norteamericana. La zona se formó en la era del Cenozoico, en el sistema Neógeno y Cuaternario.

Existe una fractura en la zona, que se formó durante la ruptura de la roca, pero que no presenta desplazamiento entre los bloques que separa (INEGI, 2013 b).

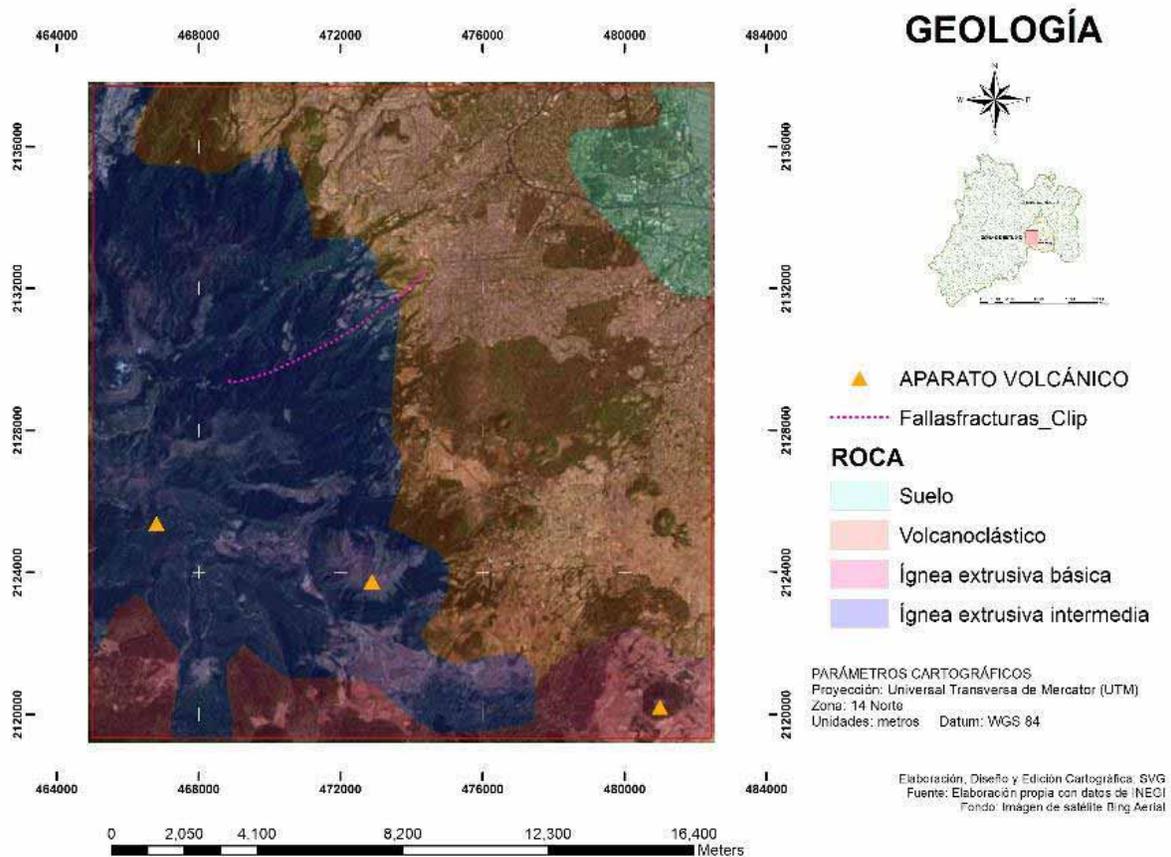


Figura 10. Tipos de rocas y Ubicación de fallas y Volcanes en la zona.

Los tipos de suelo que hay en la zona se clasifican de acuerdo a lo reportado por el Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en 1995

Andosol húmico: suelo con una capa superficial algo gruesa, oscura pero pobre en nutrientes, con terrones muy duros cuando están secos.

Feozem haplico: Suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes.

Feozem lúvico: Feozem con un subsuelo más rico en arcilla que la capa superficial.

Litosol: Suelo con menos de 10 cm. de espesor.

Zona urbana: suelo cubierto por la zona urbana (INEGI, 1998).

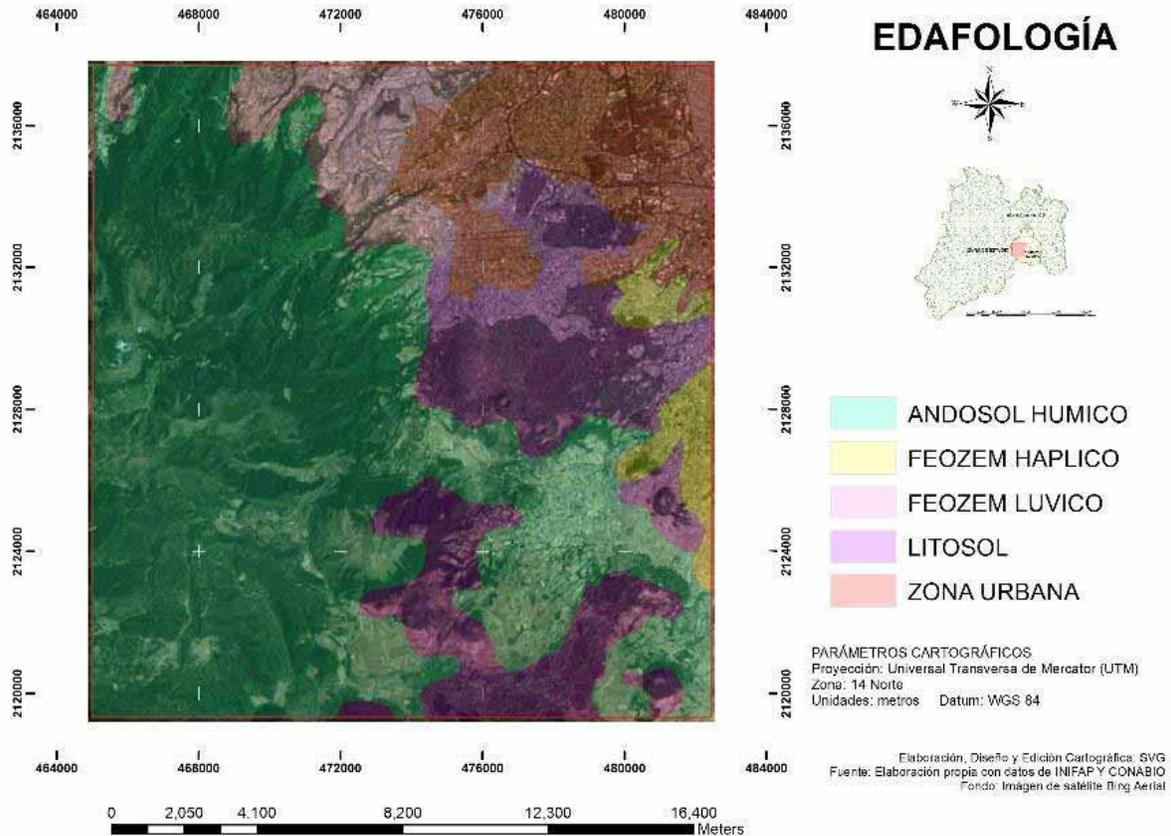


Figura 11. Tipos de suelo en la zona.

En la zona se ubicaron 41 pozos y 50 tanques de agua concentrados principalmente en la superficie que tiene un uso de suelo urbano y algunos más en cerca de los terrenos que se utilizan para la agricultura. Además hay un estanque, tres plantas potabilizadoras y una recicladora.

Las principales líneas de transmisión eléctrica están dentro de los límites urbanos, pero también hay una línea que atraviesa de sureste a suroeste por la zona boscosa, con dos subestaciones eléctricas dentro de la zona urbana.

Según la información contenida en la cartografía urbana del área de interés sólo hay cinco líneas telefónicas (cartografía topográfica de INEGI, 2009).

Además dentro de la zona urbana se ubica un gasoducto.

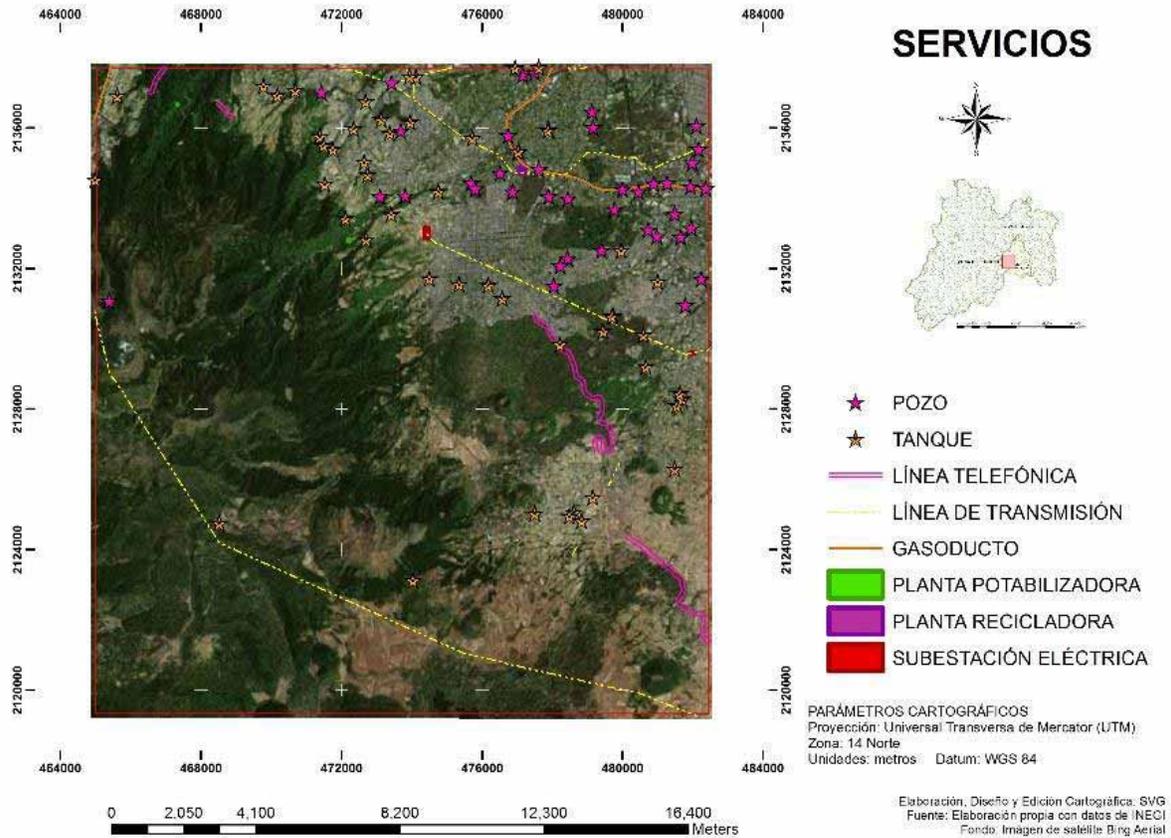


Figura 12. Ubicación de servicios en la zona.

De acuerdo a la PAOT existen más de 100 denuncias por la presencia de asentamientos irregulares ubicados principalmente en al sureste donde hay cultivos y algunos poblados muy antiguos (Cartografía PAOT, 2010).

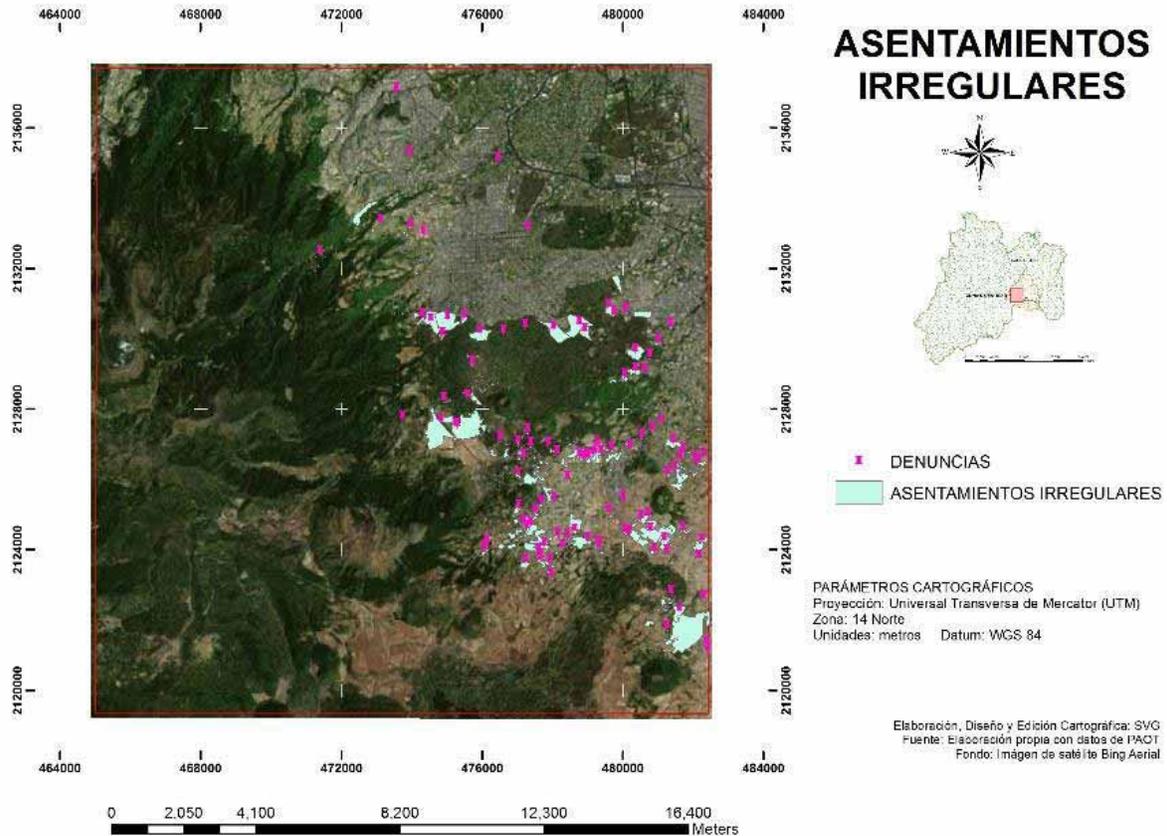


Figura 13. Asentamientos irregulares de acuerdo a la PAOT.

De acuerdo a la PAOT en el noreste del área de estudio se localizan las superficies que son susceptibles de inundarse. Además en la superficie ya urbanizada marcan unos puntos de riesgo geológico, ya que allí los taludes son inestables y pueden colapsar. Igualmente señala en la zona norte cuatro puntos de riesgo hidrometeorológico que podrían provocar agrietamientos por hundimientos.

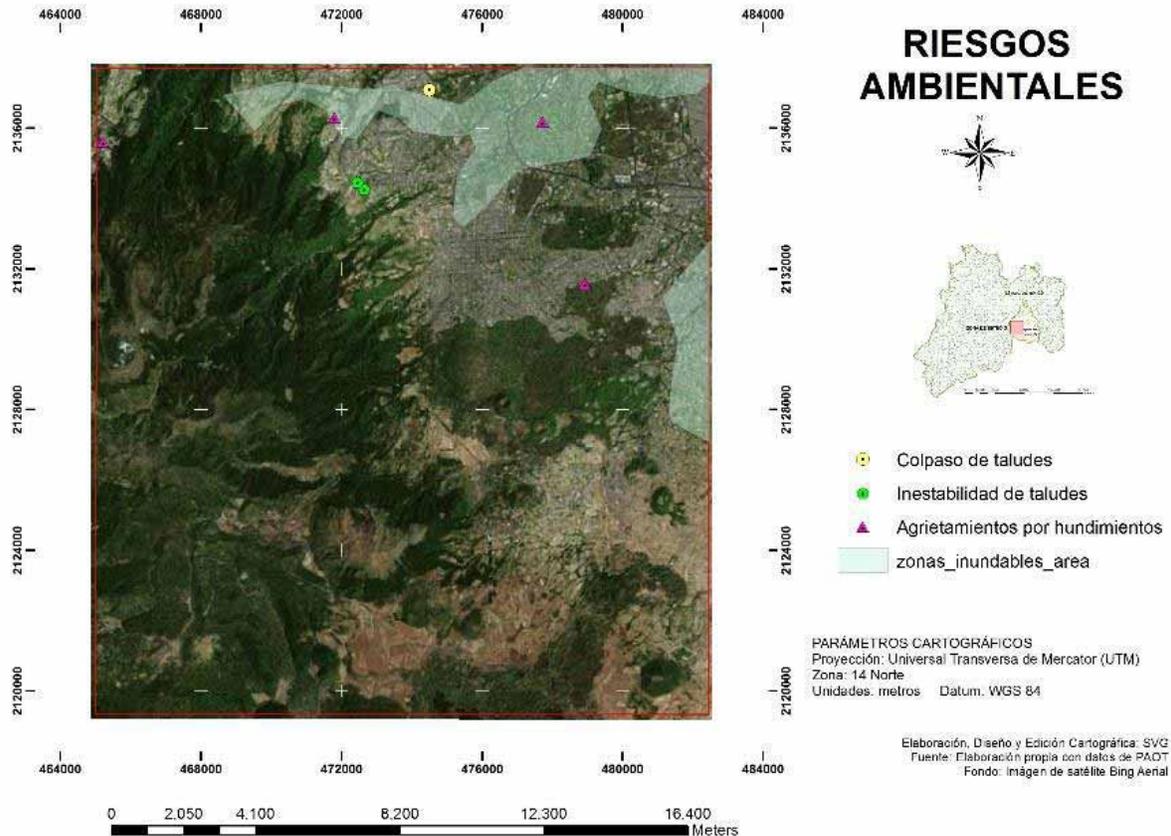


Figura 14. Riesgos Ambientales en la zona.

III.1.3. Modelo conceptual general

Para conocer el cambio de uso de suelo en la Sierra del Ajusco y sus alrededores, se construyeron los mapas de uso de suelo de la zona de interés en base a la información de las series I a la V (INEGI); se evaluaron los cambios de superficie de cada categoría de uso de suelo y vegetación entre estas. Se realizó una validación en campo de cada una de las categorías. Con estos mapas se desarrollaron los modelos de crecimiento urbano por medio de la técnica de cadenas de Markov y autómatas celulares, el modelo fue validado haciendo un pronóstico al año 2011 y comparando los resultados con la serie V. Se elaboró un modelo por medio de regresión logística para conocer cuáles eran las variables que influían en el crecimiento urbano. Se construyó un modelo por medio de la técnica de evaluación multicriterio, utilizando la combinación lineal ponderada y realizando la ponderación de los criterios por medio de la técnica de Saaty para asignar aptitud de uso urbano a diferentes superficies de la zona (figura 15).

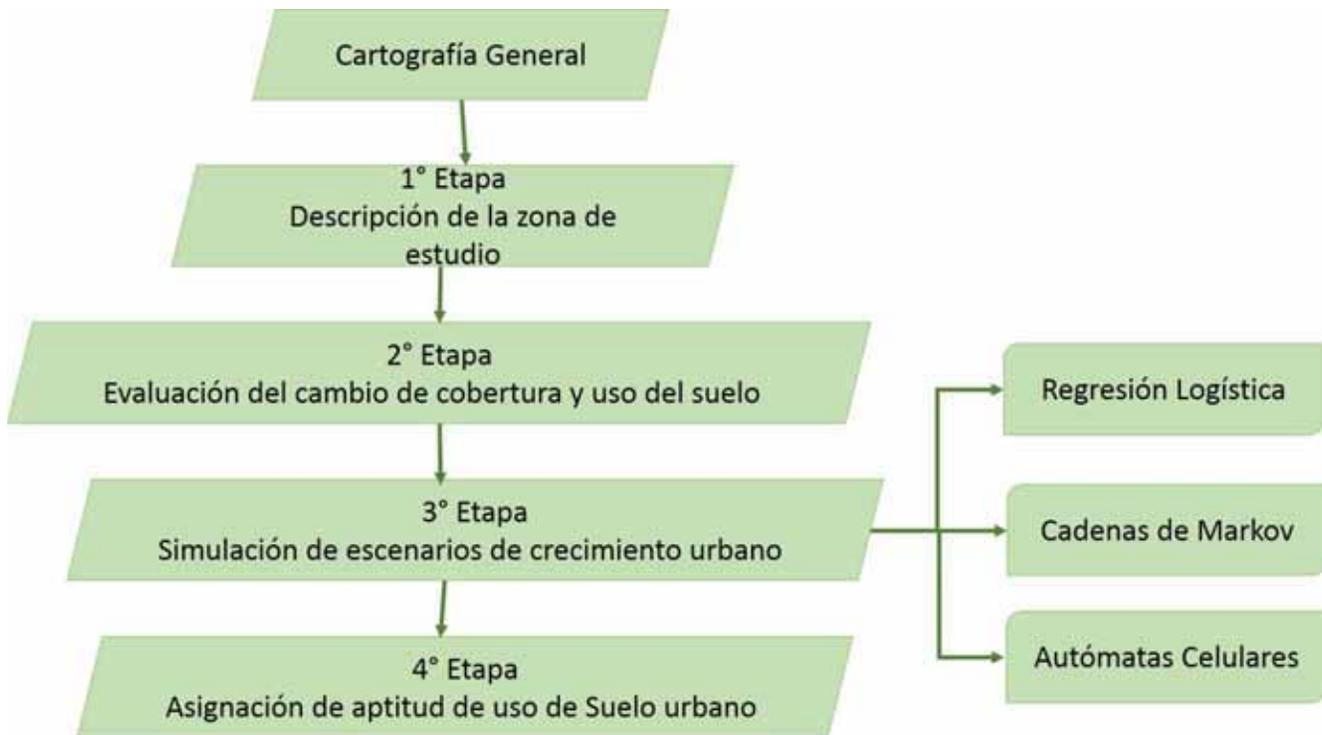


Figura 15. Mapa conceptual general.

III.1.4. Sistemas de información geográfica y generación de información

Se buscó toda la información disponible en formato compatible con el SIG sobre las características físicas, biológicas, sociales -entre otras- de las diferentes páginas de instituciones oficiales que hubiera específicamente del polígono estudiado, o en su defecto, del Estado de México, el D.F. e inclusive del país.

La cartografía debe tener asociado un archivo con el datum (coordenadas) con el que fue elaborada, esto es el sistema de coordenadas con que está siendo presentada la información, así se determinó que toda la cartografía sería procesada en coordenadas UTM WGS84 dentro de la zona 14N y se les asignó este datum.

Para procesar los datos y generar los mapas de trabajo, se utilizó el software Arc Map e IDRISI.

El límite del área de estudio se hizo trazando un polígono entre los cuatro vértices marcados por las coordenadas geográficas utilizado por Benítez et al. (1987), una vez trazado este polígono se calculó el área.

El polígono de estudio sirvió como base para hacer los mapas de división política, ANP, hidrografía, clima, provincias fisiográficas, red vial, servicios (gasoductos, líneas telefónicas líneas de transmisión, tanques, pozos de agua y subestaciones eléctricas), edafología, geología, modelo de elevación digital (MDE) y asentamientos irregulares (figura 16).

	Datos de entrada	Procesamiento	Cartografía de la zona
1° ETAPA Descripción de área de estudio	División Municipal de la República Mexicana		Delegaciones y Municipios
	Áreas Naturales Protegidas (CONANP y PGOEDF)		ANP
	Modelo de elevación Digital, Provincias Fisiográficas		MDE y Orografía
	Hidrología de México, cuencas y subcuencas	Asignación DATUM (UTM WGS84 14N)	Área de recarga, cuerpos de agua y corrientes de flujo intermitente
	Clima de la República Mexicana	ZONA DE ESTUDIO	Tipo de Clima
	Conjunto topográfico		Red vial, oleoductos, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, línea telefónica, tanques y pozos
	Fallas y fracturas de la RM y Tipo de rocas		Geología y tipo de roca
	Suelos dominantes de la RM		Edafología
	Asentamientos irregulares en el DF		Asentamientos irregulares

Figura 16. Metodología aplicada para la 1° Etapa.

El análisis del cambio de cobertura y uso de suelo se hizo en base a la información disponible por INEGI, la cual está desarrollada por medio de la aplicación del método científico; por lo cual, se tiene la certeza de que son datos de alta confiabilidad (INEGI, 2005, 2006, 2010 y 2013).

Se descargaron las cartas de uso de suelo y vegetación de la Ciudad de México (carta E1402) de las cinco series publicadas por el INEGI, se verificó el datum e igualmente se les asignó las coordenadas UTM WGS84 dentro de la zona 14N y se hizo el corte de la zona de interés, después de esto se calculó la superficie de cada polígono clasificado en cada categoría de uso de suelo. La diferenciación y clasificación de la cubierta vegetal está hecha con base en el Sistema de Clasificación de los Tipos de Vegetación de México de INEGI (que considera los elaborados por Miranda & Hernández X. y Rzedowski para México). De acuerdo a lo anterior, se verificó que los diferentes polígonos que hay en la zona de estudio mantuvieran el nombre del tipo de vegetación en todas las series, es decir si en 1984 estaba clasificado como Bosque de oyamel un polígono, se verifica que este mismo polígono en la serie V tenga la clasificación de tipo de vegetación como Bosque de oyamel.

La serie I presenta cierta discrepancia con respecto a las otras series, puesto que fue digitalizada de un modelo cartográfico impreso. Sin embargo, se hicieron los mejores ajustes disponibles para poder realizar las comparaciones con las otras series.

Benítez et al. (1987) llevaron a cabo el estudio de cambio de cobertura de suelo en la Sierra del Ajusco por medio de fotografías aéreas, las cuales ayudan a tener datos más precisos acerca del uso de suelo y vegetación que tiene la zona, ya que al igual que las imágenes de satélite de alta resolución están disponibles en escalas más pequeñas, lo que da mayor resolución. El análisis de este tipo de imágenes requiere de experiencia en fotointerpretación y de un tiempo

adecuado de acuerdo a las dimensiones del terreno que se desea evaluar; además, en ocasiones se requiere de bastantes recursos económicos para disponer de ellas. Sin embargo, el presente trabajo fue realizado por medio de las cartas de uso de suelo y vegetación disponibles en la página web del INEGI, ya que no se contaba con los recursos y el tiempo necesario.

Para trabajar en el software de IDRISI fue necesario exportar los archivos generados en Arc Map, se les asignó el sistema de coordenadas UTM 14 Norte. Todos los archivos deben tener los mismos parámetros espaciales para ser comparados, en este caso se definieron de acuerdo al MDE. Se convirtieron todos los archivos de vector a raster.

III.1.5. Método para calcular la superficie y evaluar cambios de cobertura y uso de suelo

Teniendo el mapa de uso de suelo (USUE) de la serie I y serie V, se asignó una clasificación común para cada categoría de USUE y un código numérico para identificarlas, en el programa Arc Map se hizo una intersección entre ambas series, esto da como resultado que se unan las tablas de datos de ambas series y con la columna del código numérico se pueden observar y cuantificar los polígonos que presentaron cambio de categoría de USUE, posteriormente se calcula la superficie de cambio a zona urbana. Con esta información se graficó el cambio de superficie ocupada por cada categoría en las cinco series, así como el porcentaje que ocupaba cada tipo de USUE en la serie I y en la serie V del total de la superficie de interés y una gráfica donde se observa el cambio temporal de uso de suelo entre las series.

Con el software IDRISI se calculó la matriz de cambio expresado en pixeles entre la serie I y la serie V, así como un índice de concordancia (Kappa) y se construyó una imagen con los cambios entre las series (figura 17).

Adicionalmente se descargó una imagen de satélite del servidor Glovis (USGS) de diciembre del 2014, esta imagen fue procesada en Arc Map para tener la zona de interés en una gama de colores donde se pudiera distinguir la zona urbana, de acuerdo al criterio de los autores del presente proyecto, se trazaron los límites de la zona urbana hasta donde se observaba infraestructura urbana, aunque esta estuviera mezclada con zonas de cultivo, pero respetando las superficies donde se observaba vegetación arbórea o arbustiva.

2° ETAPA
Evaluación del cambio de cobertura y uso del suelo

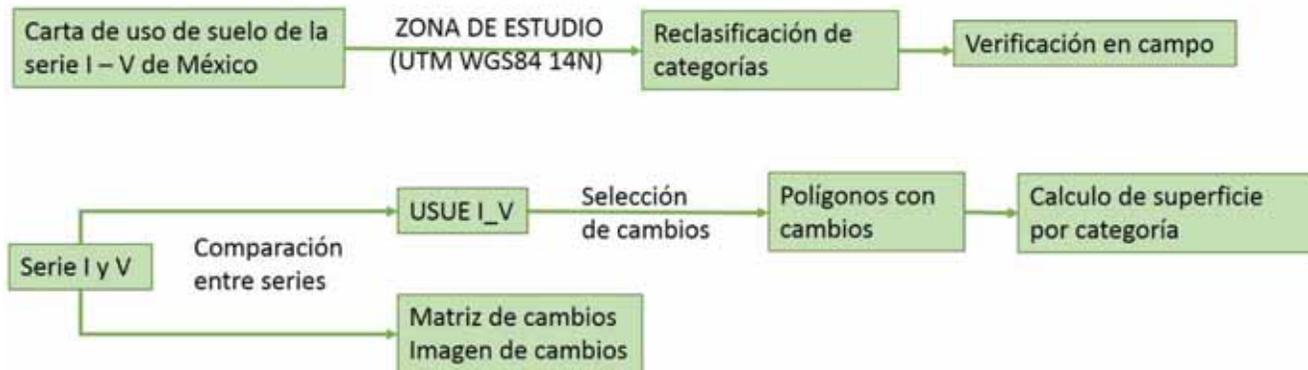


Figura 17. Metodología seguida en la 2° etapa.

III.1.5.1. Validación en campo

De acuerdo a la información del INEGI sobre las categorías de uso de suelo que tiene la zona de estudio en la última serie y con la información de vialidades, se realizaron 3 recorridos con duración promedio de 4 horas para verificar que la clasificación (hecha por INEGI) coincidiera con el uso de suelo que existe en los diferentes polígonos. El muestreo se hizo de manera dirigida hacia los polígonos con más fácil acceso, se tomaron fotografías de la vegetación y en su caso se observó a través de los binoculares el arbolado de mayor tamaño. Con ayuda de expertos se determinó el tipo de vegetación dominante en cada polígono. Además se georeferenciaron algunas imágenes para verificar que estuvieran dentro de los límites de los polígonos marcados en la carta de uso de suelo de la serie V.



Figura 18. Recorridos en la zona de estudio.

III.1.6. Modelado de escenarios de crecimiento urbano

III.1.6.1. Modelado con regresión logística

Selección de variables independientes

Para formar la matriz de datos con la cual se realizó la regresión logística, primero se definieron cuáles eran las variables explicativas que se considerarían en el modelo. En este caso se consideraron 10 variables de acuerdo a lo reportado en literatura (Batisani y Yarnal, 2009; Akin et al. 2015; Gómez A. 2009; Amuzurrutia-Valenzuela et al. 2015) y asesoramiento de especialistas del tema las cuales fueron:

1. **Orientación**, se obtuvo usando el MDE como archivo de entrada, se generó una imagen con valores de 0 a 360° de acuerdo a la dirección que presentan las laderas con respecto a la ubicación del sol, en la superficie plana se le asigna valor de -1. Según los especialistas se supondría que el desarrollo urbano se daría en las laderas con una orientación hacia el sol.
2. **Pendiente**, se obtuvo usando el MDE como archivo de entrada, se puede calcular en porcentaje o en grados decimales, se obtiene una imagen con una gama de colores de acuerdo al valor de pendiente que se calculó. La zona urbana no debería construirse sobre pendientes muy pronunciadas ya que existe el riesgo de derrumbes. Según el PGOEDF la zona urbana está en una pendiente de 8°. En este caso se consideró una pendiente de 0 a 16° como lo más apto.
3. **Altitud**, se obtuvo usando el MDE como archivo de entrada, se obtiene una imagen con un gradiente de colores de acuerdo a la altitud que en este caso va de los 2,250 a los 3,930 msnm. De acuerdo al PGOEDF la altitud promedio donde hay zona urbana son los 2,580 msnm. En este caso se determinó que lo más apto para la urbanización sería de 2,500 a 2,600 msnm.
4. **Distancia a corrientes intermitentes**, se obtuvo usando el mapa con la ubicación de las corrientes en la zona (figura 7), se genera una imagen con un gradiente de color negro que marca las zonas más cercanas a los flujos de agua y un color rojizo para las más alejadas, en este caso van de los 0 a los 6,000 m. Según los especialistas se deben respetar unos 10 m a los costados del lecho del río de acuerdo a su flujo más abundante para la edificación de viviendas. Además en la imagen de satélite (Google Earth) se observó que algunas viviendas están a una distancia de ± 15 m de las corrientes de agua.
5. **Distancia a cuerpos de agua**, se obtuvo usando el mapa con la ubicación de los cuerpos de agua (figura 7), se obtiene una imagen con gradientes de color de acuerdo a las zonas más cercanas y más lejanas de estos de 0 a 9,000 m. Según los especialistas para evitar la contaminación de los mantos freáticos se debe respetar unos 50 m alrededor de estos cuerpos de agua para el establecimiento de zonas urbanas.

6. **Distancia a red vial**, se obtuvo usando el mapa con la ubicación de los caminos, calles, carreteras y avenidas (figura 9), generando una imagen de color de acuerdo a las zonas más cercanas y más lejanas de estos de 0 a 1,700 m, siendo cero el más cercano. Según los especialistas, las zonas urbanas se desarrollan preferentemente cerca de las vialidades.
7. **Distancia a la zona urbana**, se obtuvo usando el mapa con el polígono de la zona urbana que marca la serie I, generando una imagen de color de acuerdo a las zonas más cercanas y más lejanas de estos de 0 a 16,000 m, siendo el cero el más cercano. Según los especialistas, las zonas urbanas se desarrollan también cerca de los poblados ya establecidos.
8. **Tipos de suelo**, se obtuvo usando el mapa de los tipos de suelo (figura 11), en Arc Map a la base de datos de este mapa se le agregó una columna con el tipo de suelo (en el caso de los polígonos que decían poblados se les clasificó como zona urbana) y se les agregó un código numérico a cada categoría. Según el PGOEDF la zona urbana se desarrolla sobre suelo feozem háplicos y andosoles húmicos.
9. **Tipos de roca**, se obtuvo usando el mapa de los tipos de roca (figura 10), en Arc Map a la base de datos de este mapa se le agregó una columna con el tipo de roca (en el caso de los polígonos que decían no aplicable se les clasificó como suelo) y se les agregó un código numérico a cada categoría. Según el PGOEDF la zona urbana se desarrolla sobre material parental de brechas y tovas volcánicas.
10. **Cobertura de suelo**, se obtuvo por medio de IDRISI usando el mapa de uso de suelo de la serie I, en Arc Map a la base de datos de este mapa se agrega una columna y se asigna una clasificación común para cada categoría de USUE y un código numérico para identificarlas. Según el PGOEDF la zona urbana se desarrolla sobre campos de cultivo y pastizales (figura 19).

Todas las variables fueron construidas a través de distintos módulos (DISTANCE, RECLASS, TOPOGRAPHIC VARIABLES, entre otros), que están disponibles dentro del software IDRISI. En algunos casos utilizando como archivo de entrada los modelos cartográficos elaborados previamente en Arc Map.

FACTOR	VARIABLE	CRITERIO	FUENTE DE DATOS
Topografía	Orientación	0 a 360° Plano -1 80° a 120° Este: mejor orientación	Modelos de elevación digital (MDE) de la zona metropolitana del valle de México
	Pendiente	0 - 65° 1 a 16° más apto para urbano	
	Altitud	2250 - 3930 msnm 2500 – 2600 más apto para urbano	
Hidrología	Distancia a corrientes intermitentes	Distancia de 0 a 6000 m ≥ 10m	Carta de la Región Hidrológica 12 y 18 y 26.
	Distancia a cuerpos de agua	Distancia de 0 a 9000 m ≥ 50m	
Urbanización	Distancia a red vial	Distancia 0 a 1700 m ≥ 100 m	Conjunto topográfico
	Distancia a la zona urbana	Distancia 0 a 16000 m ≥ 200 m	Carta de uso de suelo y vegetación del año 1984, (Serie I), de la Ciudad de México.
Suelo	Tipos de suelo	zona urbana 1 andosol húmico 2 feozem háplico 3 feozem lúvico 4 Litosol 5	Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana
Sustrato Geológico	Tipo de roca	Suelo 1 Volcanoclástica 2 Ígnea extrusiva intermedia 3 Ígnea extrusiva básica 4	Carta Geológica
Uso y cobertura de suelo	Cobertura de suelo	Zona urbana 1 Bosque encino 2 Bosque encino-pino 3 Bosque oyamel 4 Bosque pino 5 Bosque pino-encino 6 Pastizal 7 Agricultura de temporal 8 Bosque cultivado 9	Carta de uso de suelo y vegetación del año 1984, (Serie I), de la Ciudad de México.

Figura 19. Variables consideradas para la RL.

La variable dependiente se construyó con la superficie de la zona urbana que creció entre la serie I y serie V, es necesario que este en código binario, por lo que se le asignó valor de 1 a la zona urbana y 0 a todo lo demás.

Por medio de IDRISI se generaron 1000 puntos al azar sobre la superficie (esto para tener aproximadamente el 1% de la superficie de acuerdo a la resolución de la imagen que es de 129,870 píxeles) y se hizo una extracción para conocer si estos están en la zona urbana o no, es decir si tienen valor de 1 o 0. Con estos datos se construyó la segunda columna de la matriz ya que la primera contiene un número consecutivo de identificación (ID) de cada punto. La extracción se aplicó en cada variable independiente y se fueron agregando las columnas a la matriz, en cada caso se obtuvo el valor correspondiente en el punto de muestreo para la variable independiente que se estaba extrayendo (figura 20).

FID	VALOR VAR. DEP	ALTITUD	DIS_AGUA	DIS_CALLES	DIS_CORRIENTES	DIS_ZU1	ORIENTACION	PENDIENTE	TIPO_ROCA	TIPO_SUELO	COB_SUELO
115	1	2740	4605.703125	0	0	2013.082153	88.2100906	32.0156212	1	4	8
116	0	3722	1930.025879	70.7106781	111.8033981	9861.541016	352.0928345	36.345562	3	2	4
117	0	3260	474.3416443	200	50	10991.47363	254.0546112	21.8403301	4	2	7
118	0	3008	2666.927002	50	206.1552887	6207.253906	44.9999962	11.3137083	1	2	8
119	0	2632	2247.220459	50	2973.213867	1872.164551	32.0053864	9.4339809	1	5	1
120	1	2397	1931.320801	403.1128845	1511.621704	427.2001953	59.0362396	5.8309517	1	5	1
121	0	3712	1947.434204	0	200	9582.536133	4.7636418	36.1247826	3	2	4
122	0	3570	2469.817871	111.8033981	50	13108.96582	198.4349518	3.1622777	4	2	4
123	0	3560	1903.943237	200	50	7554.634277	7.1250162	8.0622578	3	2	4
124	1	2645	1868.154175	50	1513.274536	500	349.3803406	16.27882	1	5	1
125	0	2416	672.6812134	0	552.2680664	0	18.434948	9.4868326	1	1	9

Figura 20. Ejemplo de matriz para RL.

Se realizó una prueba estadística (coeficiente Spermán) a las variables independientes (cuantitativas) para verificar que no fueran redundantes entre sí. También se verificó por chi cuadrada que las variables cualitativas tuvieran una distribución normal.

Una vez elaborada la matriz y verificando estadísticamente que las variables no fueran redundantes entre sí y que siguieran una distribución normal, se cargó en el software SPSS, dentro del cual se corrió el módulo de regresión logística binaria, seleccionando la variable dependiente, las covariables y el método por el cual se deseaba realizar la regresión. En este caso, se hicieron diferentes corridas con los tres métodos hasta que se obtuvo el valor más alto de coeficiente de correlación global que fue con *pasos adelante*. Dentro del módulo se cargaron como variables categóricas el tipo de suelo, tipo de roca y cobertura del suelo. Se corrió la regresión con el total de los datos y con una muestra (40%).

Con los valores del parámetro estimado (B) de cada variable se construyó la ecuación de la regresión logística con las covariables que quedaron al final del proceso.

$$Y = \frac{e^z}{1 + e^z} \dots \text{ecuación 1}$$

Donde z es

$$Z = \sum (\alpha + \beta_i * X_i) \dots \text{ecuación 2}$$

α es el coeficiente de la constante

β_i es el parámetro estimado de cada variable

X_i es cada covariable

Que en este caso queda de la siguiente manera con uno de los modelos que se corrieron:

$$z = \sum \left[\begin{aligned} &(-10.256 - 0.001 * [dist_{zonaurbi}] + (-0.078 * [pendiente]) + (14.240 * [roca suelo]) + (10.932 * [rocavolcano]) + \\ &(-1.834 * [rocs ignea]) + (-2.519 * [suelo zu]) + (-0.403 * [suelo andosol hum]) + \\ &(-1.786 * [suelo feozem hap]) + (1.171 * [suelo feozem lw]) + (-1.331 * [suelo litosol]) + (-1.471 * [cob_zona urbana]) + \\ &(1.711 * [bosque encino]) + (-16.774 * [bosque encino - pino]) + \\ &(-14.936 * [bosque oyamel]) + (-14.111 * [bosque pino]) + \\ &(-11.650 * [bosque pino - encin]) + (2.208 * [pastizal]) + (2.339 * [temporal]) \end{aligned} \right]$$

Por medio de la herramienta de calculadora de imágenes de IDRISI se hizo la operación para obtener el valor de Z que luego se sustituyó en la ecuación 1 con lo que se obtuvo una imagen que muestra la probabilidad de superficies con uso urbano, de acuerdo a las covariables del modelo. Posteriormente esta imagen fue transformada a real binaria (0 a 1) y fue clasificada como nada probable (0-0.25), poco probable (0.26-0.5), muy probable (0.51-0.75) y totalmente probable (0.76-1).

La imagen obtenida a través del modelo se comparó con la imagen de crecimiento de la zona urbana entre la serie I y V tanto en IDRISI como Arc Map para ver qué tanta concordancia había entre estas dos imágenes.

Se calculó el índice Kappa para ver la similitud de estas imágenes y para verificar que las variables que consideró el modelo, son las que tienen una alta influencia en el crecimiento urbano.

Además de haber realizado la regresión logística con el software SPSS también se hizo la regresión logística binaria con el software IDRISI, obteniendo dos imágenes: una con la probabilidad de crecimiento urbano y otra con el residual de este ajuste; además, se obtuvieron los índices ROC que es un método para comparar un mapa booleano de la realidad frente a un mapa de aptitud, este va de 0 a 1, donde 1 indica ajuste perfecto 0.5 indica un valor al azar y un valor entre 0.5 y 1 indican cierta asociación entre las variables. Cuanto mayor sea el ROC, mejor será el ajuste. De la misma manera, esta imagen se comparó con la de USUE serie V y se verificó su similitud.

El objetivo principal de utilizar esta técnica fue para conocer que variables influyeron más en el crecimiento urbano (figura 21).

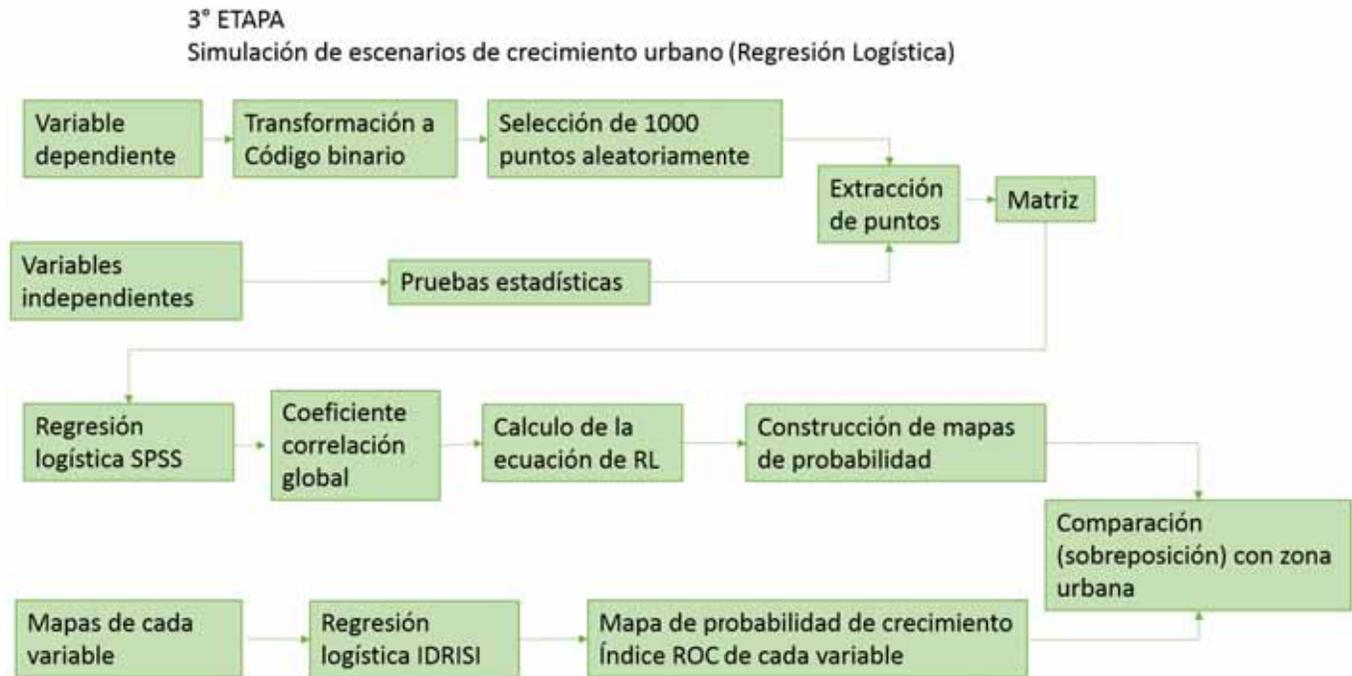


Figura 21. Metodología de la 3° Etapa con RL.

III.1.6.2. Modelado con Cadenas de Markov

Dentro del software IDRISI se cargaron las imágenes de USUE serie I y serie II en el módulo MARKOV y se definieron los años transcurridos entre estas series (13 años). Se decidió considerar el año de publicación de la Serie I que fue en 1984 y de la Serie II en 1997 para realizar los pronósticos. En este caso, se decidió predecir el escenario después de 14 años para poder compararlo con la carta USUE de la serie V que fue publicada por INEGI en 2011. Se consideró la comparación entre estas dos categorías puesto que comparten las mismas categorías de uso de suelo y vegetación.

Se obtuvieron como resultado dos matrices: una de probabilidad de cambio y otra con el cambio de superficie de una categoría a otra, así como un conjunto de imágenes con las probabilidades de uso de suelo por cada categoría, basado en los usos de suelo de las series I y II. La imagen obtenida con la categoría de uso de suelo urbano se procesó para eliminar el efecto confeti y obtener una imagen booleana.

Posteriormente se corrió nuevamente el modelo, pero esta vez con los USUE de las series II y IV. Se decidió considerar el año de publicación de la Serie II que fue en 1997 y en el caso de la Serie IV se consideró el año 2007 que fue cuando se levantaron los datos, esto debido a que el INEGI la publicó hasta 2010 y si se considera este año sería un lapso muy corto transcurrido hasta la serie V (2011). Igualmente se hizo un pronóstico de 4 años para compararlo con la serie V. Se consideró que este modelo era mejor puesto en estas series, todas las categorías de uso de suelo están presentes.

Para validar ambos modelos, se procesó la imagen obtenida con la categoría de zona urbana para que quedara en código binario y así compararla con la imagen de zona urbana de la serie V y validarla por métodos estadísticos (índice Kappa y Cramer's). Igualmente se hizo con todas las demás categorías. Además en IDRISI se traslaparon ambas capas para ver visualmente la similitud entre las imágenes y con ello validar el modelo y construir un escenario (figura 23).

Una vez validada la imagen que se creó por este método, se procedió a elaborar los escenarios de crecimiento urbano a corto (2030) y mediano plazo (2045).

III.1.6.3. Modelado con Autómatas celulares y Markov

Se construyeron los mapas de aptitud de suelo de acuerdo a las referencias (Akin et al. 2015 y Moghadam y Helbich 2013) es decir, que zonas son las más aptas para urbanizarse. Se utilizaron algunos de los mapas que ya se habían elaborado para la regresión logística.

Para las coberturas de suelo se usó la información de la serie I asignando al pastizal y a los cultivos la categoría de 'los más aptos' y a los bosques la de 'los menos aptos'; en el caso de la pendiente, se trabajó en grados, siendo la más apto menor a 8°; para el tipo de roca, las volcánicas fueron las más aptas; para el tipo de suelo, el andosol húmico fue el menos apto; asimismo se consideró una zona de 100 m alrededor del polígono delimitado como zona urbana en la serie I (figura 22).

FACTOR	VARIABLE	CRITERIO	FUENTE DE DATOS
Uso de suelo y vegetación	Cobertura de suelo	Pastizal y cultivos "más aptos" (255) Bosques "menos aptos" (0)	Carta de uso de suelo y vegetación del año 1984, (Serie I), de la Ciudad de México.
Topografía	Pendiente	≤ 8° "más apto"	Modelos de elevación digital (MDE) de la zona metropolitana del valle de México
Suelo	Tipo de suelo	feozem háplico, feozem lúvico y Litosol "más apto" Andosol húmico "menos apto"	Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana
Geología	Tipo de roca	Volcanoclástica "más apto" Ígnea extrusiva intermedia y Ígnea extrusiva básica "menos apta"	Carta Geológica

Figura 22. Variables consideradas para CA_MARKOV.

Las variables independientes fueron estandarizadas por medio de IDRISI. Se codificaron los mapas en bytes quedando con valores cercanos a 255 lo más apto para urbanizarse y con cero lo menos apto.

Una vez que se tuvieron las imágenes de aptitud de suelo se corrió el módulo CA_MARKOV en IDRISI y se usó la matriz de áreas que se obtuvo previamente con Markov y como mapa base

el de USUE serie I (1984), proyectando a 27 años, es decir al 2011. Posteriormente se corrió nuevamente el modelo usando como base la serie II y haciendo una proyección de 14 años, que fue el periodo transcurrido entre 1997 y 2011. Se obtuvo una imagen para cada corrida con las probabilidades de uso de suelo por categoría, basada en los criterios de aptitud, la cual se comparó con la imagen de USUE de la serie V y se validó estadísticamente (índice Kappa y Cramer's).

Una vez validada la imagen que se creó por este método, se procedió a elaborar los escenarios de crecimiento urbano a corto (2030) y mediano plazo (2045) (ver figura 23).

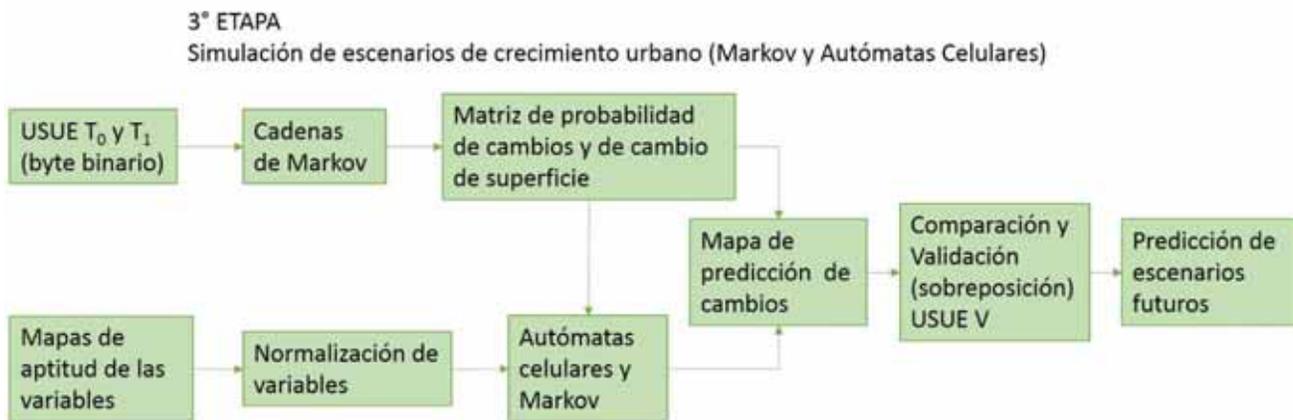


Figura 23. Metodología de la 3ª Etapa con Markov y CA.

III.1.6.4. Modelado con análisis multicriterio (MCE) y elaboración de mapas de aptitud

Se construyeron los mapas con las zonas restrictivas para el crecimiento urbano ubicando las ANP, las zonas de recarga de acuíferos y los cuerpos de agua (figuras 5 y 7). A estos se les agregó una zona de protección de 50 m alrededor (BUFFER) de acuerdo a las referencias (POETEM). También se localizaron las corrientes de agua, líneas de transmisión eléctrica y gasoductos dejando una superficie de 50 m a cada lado (figuras 7 y 12). Los mapas de aptitud con las restricciones fueron transformados a código real binario, dando valores de cero a los polígonos de las ANP y los cuerpos de agua. La zona de recarga del acuífero se localiza dentro de los límites del Parque Estatal Otomí Mexica, por lo que fue sólo considerado el polígono del parque como restrictivo (figura 24). Las zonas inundables no fueron consideradas puesto que ya existe infraestructura urbana en estas zonas (figura 14).

FACTOR	VARIABLE	CRITERIO	FUENTE DE DATOS
Hidrología	Distancia a cuerpos de agua	Protección de 50 alrededor de los cuerpos de agua	Carta de la Región Hidrológica 12 y 18 y 26.
	Área de recarga	Completamente protegido	
Biodiversidad	ANP	No se debería urbanizar en estas zonas, pero en algunas de ellas ya hay infraestructura urbana	Carta de Áreas Naturales Protegidas de la República Mexicana del

Figura 24. Restricciones utilizadas en la MCE.

Se buscaron en la zona fallas, volcanes activos, pistas de aterrizaje y algún otro elemento que pudiera ser restrictivo por normatividad o por seguridad para el establecimiento de la zona urbana, pero no se localizaron (figura 14).

Los mapas de aptitud (factores) se elaboraron de acuerdo a las referencias (Molero et al. 2007; Rosa et al. 2010; Da Silva y Cardozo 2015; Henriquez y Qüense 2010), de la siguiente manera:

FACTOR	VARIABLE	CRITERIO	Función de normalización y puntos críticos	FUENTE DE DATOS
Uso de suelo y vegetación	Cobertura de suelo	Pastizal y cultivos "más aptos" (255) Bosques "menos aptos" (0)	Sigmoidal decremento monótono	Carta de uso de suelo y vegetación
Topografía	Pendiente	$\leq 8^\circ$ "más apto"	Sigmoidal decremento monótono	Modelos de elevación digital
	Altitud	2200 a 2800 "más apto"	Sigmoidal decremento monótono	
Suelo	Tipo de suelo	feozem háplico, feozem lúvico y Litosol "más apto" Andosol húmico "menos apto"	Sigmoidal decremento monótono	Mapa de suelos
Geología	Tipo de roca	Volcanoclástica "más apto" Ígnea extrusiva intermedia y ígnea extrusiva básica "menos apta"	Sigmoidal decremento monótono	Carta Geológica.
Hidrología	Distancia a corrientes	Protección de 10 m a cada costado de las corrientes Más lejano más apto (20 m a 6000m)	Sigmoidal incremento monótono	Carta de la Región Hidrológica 12 y 18 y 26
Urbanización	Distancia a calles	≥ 100 m	Sigmoidal decremento monótono	Conjunto topográfico
	Distancia a asentamientos humanos	≥ 200 m	Sigmoidal decremento monótono	Carta de uso de suelo y vegetación

Figura 25. Factores utilizados en la MCE.

Los mapas de aptitud fueron transformados a código byte binario y estandarizados de acuerdo a la función que se señala en la figura 25.

Se construyó la matriz de peso, es decir colocando un valor de importancia a cada variable de acuerdo a su influencia en el crecimiento urbano, esto con ayuda de expertos en distintas disciplinas (tablas 13, 14, 15 y 16).

Dentro del software IDRISI se corrió el módulo MCE, seleccionando la técnica de combinación lineal ponderada. Usando como restricción los polígonos de las ANP y los cuerpos de agua y como factores la altitud, la distancia a los poblados, el tipo de rocas, la distancia a calles y a corrientes intermitentes, ya que estas variables fueron las que tuvieron mayor relación con el crecimiento urbano en el modelo de regresión logística con un valores de ROC mayores a 0.65.

4° ETAPA

Asignación de aptitud de uso de Suelo



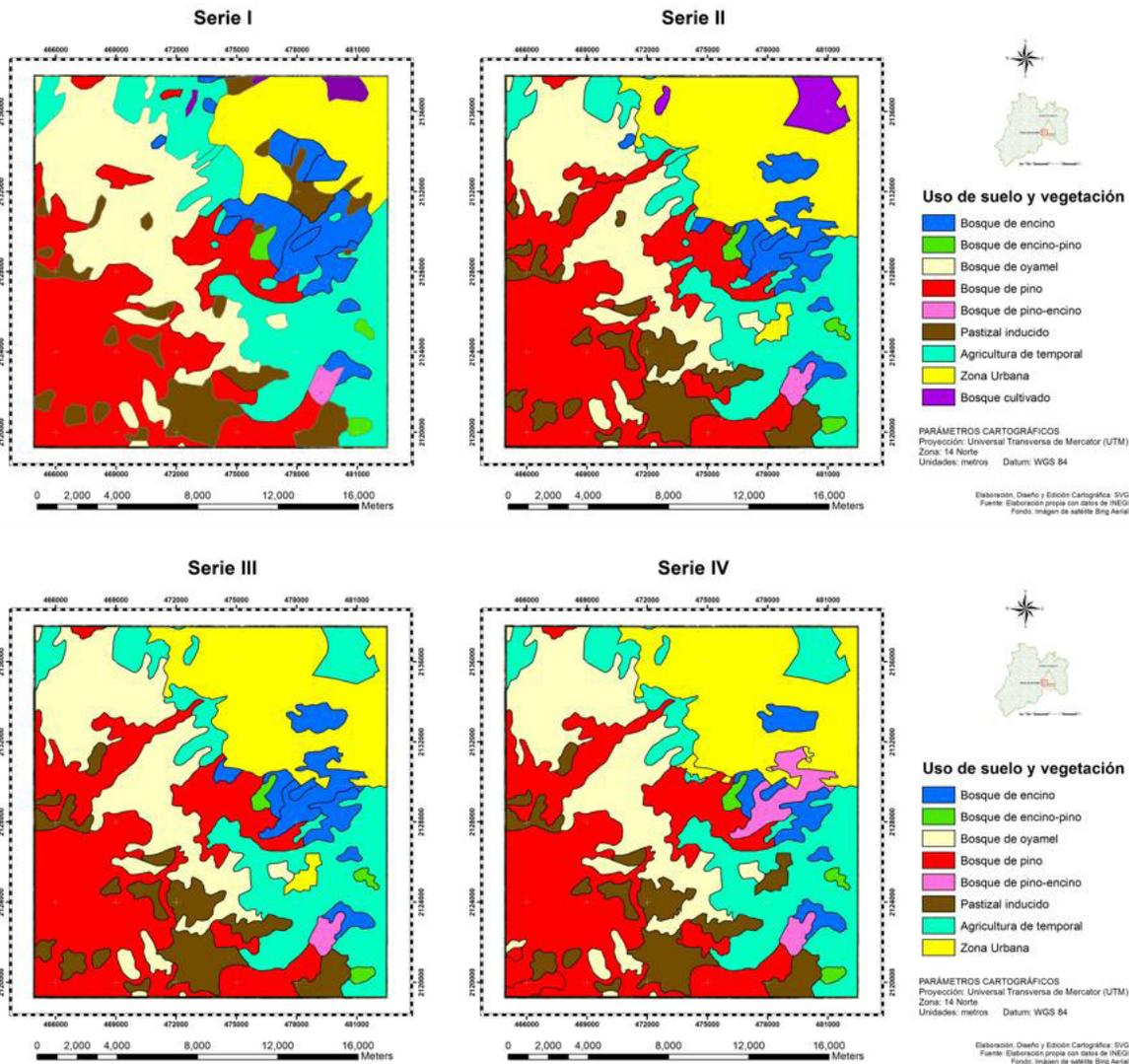
Figura 26. Metodología 4°Etapa.

CAPITULO IV

IV.1. Resultados y Discusión

IV.1.1. Evaluación de cambios por tipo de cobertura y uso de suelo entre la serie I y la serie V

A partir del análisis geo-espacial de la zona de estudio se obtuvieron los siguientes modelos cartográficos, en ellos se puede observar el cambio de uso de suelo que se dio en la zona de estudio de la serie I a la serie V (para mayor detalle ver Anexo 1).



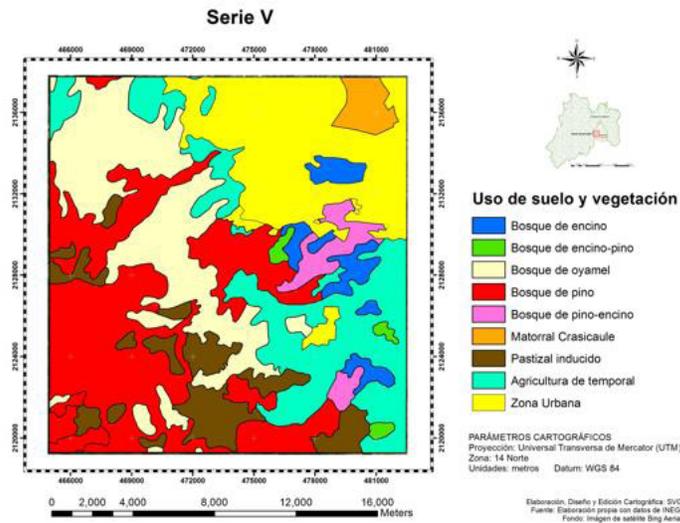


Figura 27. Cambios presentados entre las cinco series de uso de suelo y vegetación.

En la zona se identificaron 7 tipos de vegetación; Bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, matorral crasicaule y pastizal inducido, así como uso de suelo para agricultura de temporal y zona urbana.

Los tipos de vegetación reportados en las cartas de uso de suelo y vegetación de INEGI, son igual que los reportados por Benítez et al. (1987) para la misma zona en el período de 1959 - 1977. En ambos trabajos se hizo una verificación en campo para validar dicha información. La única categoría que no reportaron Benítez ibid. es la de bosque de cultivo que es una categoría que desapareció a partir de la serie III (2002), por lo tanto se considera que la clasificación de las cartas de uso de suelo y vegetación son adecuadas. Sin embargo, es necesario realizar más puntos de verificación para conocer los límites entre las diferentes categorías.

En 1984 una cuarta parte de la zona de estudio estaba cubierta por bosque de pino y la zona urbana abarcaba el 11%, en cambio para el 2011 el 27% fue bosque de pino y el 19% la zona urbana (figura 28 y tabla 5).

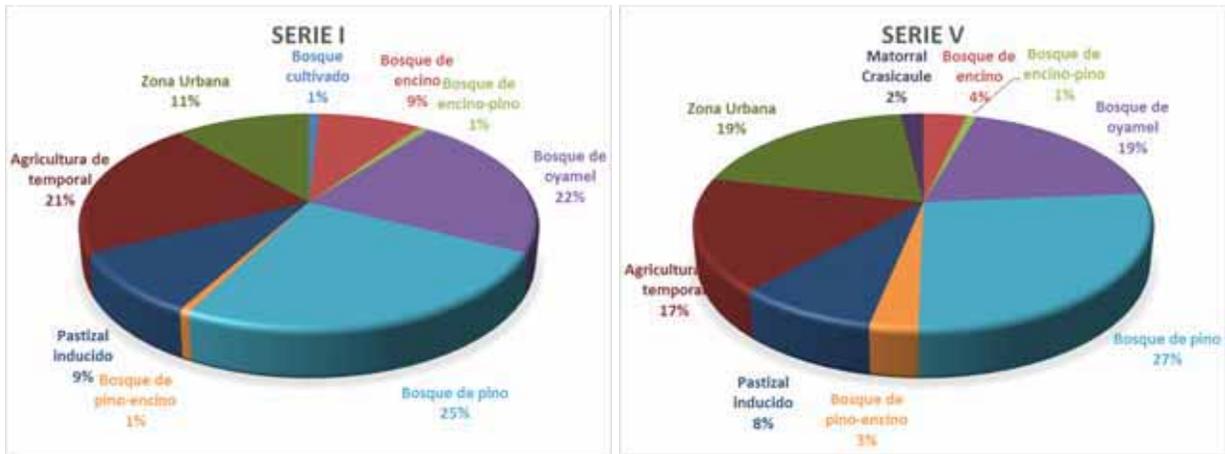


Figura 28. Gráficas comparativas del porcentaje de cubierta vegetal y uso de suelo.

Tabla 5. Cambios de superficie entre la serie I y V.
En rojo porcentajes en los cuales se reflejaron mayores cambios.

CLASE DE COBERTURA	SERIE I		SERIE V		Cambio de superficie ha
	ha	%	ha	%	
Bosque cultivado	282.61	0.87		0	-282.61
Bosque de encino	2799.50	8.67	1176.44	3.64	-1623.06
Bosque de encino-pino	281.36	0.87	262.48	0.81	-18.88
Bosque de oyamel	7123.41	22.1	6200.43	19.2	-922.98
Bosque de pino	8064.49	25	8605.93	26.6	541.44
Bosque de pino-encino	201.35	0.62	941.61	2.92	740.26
Pastizal inducido	3067.68	9.5	2745.74	8.5	-321.94
Agricultura de temporal	6790.61	21	5489.98	17	-1300.64
Zona Urbana	3691.13	11.4	6262.98	19.4	2571.85
Matorral Crasicaule		0	616.56	1.91	616.56
TOTAL	32302.14	100	32302.1	100	

De 1984 a 2011 se dieron los siguientes cambios de superficie en hectáreas de cada tipo de vegetación y uso de suelo dentro de la zona de estudio (tabla 6). Como puede observarse la zona urbana fue la que ganó más superficie (2,572 ha) y el bosque de encino fue el que perdió más superficie (1,623 ha) (figura 30). En el caso del bosque de cultivo y el matorral crasicaule, parecerá haber una pérdida y una ganancia respectivamente, pero de acuerdo a la revisión de la clasificación de los polígonos, más bien fue un cambio de clasificación que se hizo de los mismos polígonos entre las serie I y V.

Tabla 6. Cambios de superficies por categoría en las diferentes series.

TIPO	SERIE I	SERIE II	SERIE III	SERIE IV	SERIE V	Diferencia I y V
Bosque cultivado	282.61	679.58				-282.61
Bosque de encino	2799.50	1956.02	1997.06	1176.44	1176.44	-1623.06
Bosque de encino-pino	281.36	262.39	262.40	262.48	262.48	-18.88
Bosque de oyamel	7123.41	6040.94	6108.36	6200.43	6200.43	-922.98
Bosque de pino	8064.49	8498.33	8615.92	8605.93	8605.93	541.44
Bosque de pino-encino	201.35	217.47	217.45	941.61	941.61	740.26
Pastizal inducido	3067.68	2972.77	2882.28	2925.82	2745.74	-321.94
Agricultura de temporal	6790.61	5551.29	6101.78	6106.53	5489.98	-1300.64
Zona Urbana	3691.13	6123.35	6116.90	6082.91	6262.98	2571.85
Matorral Crasicaule					616.56	616.56
SUPERFCIE TOTAL	32302.14	32302.14	32302.14	32302.14	32302.14	

En la siguiente matriz se pueden ver los cambios que se dieron en la zona entre las diferentes categorías, la de agricultura de temporal fue la que cedió mayor superficie a la zona urbana (1,310 ha), seguida del bosque de oyamel que cambió a bosque de pino (1,035 ha) y el bosque de encino que igualmente cambió a uso urbano (1,054 ha). Además el bosque de pino cambió a pastizal inducido (598 ha). Igualmente 500 ha que eran usadas como pastizal inducido, fueron urbanizadas.

Tabla 7. Matriz de cambios de superficie.

SERIE I \ SERIE V	Bosque de encino	Bosque de encino-pino	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Matorral Crasicaule	Pastizal inducido	Agricultura de temporal	Zona Urbana	Bosque cultivado	TOTAL
Bosque de encino	1012	6.62		0.05	1.18		38.24	104.24	16.25		1178.58
Bosque de encino-pino	8.37	212		1.54				34.78			256.69
Bosque de oyamel	29.84		5736	227.26			115.52	103.76			6212.38
Bosque de pino	24.36	18.35	1035.18	7099	6.2		392.66	73.81			8649.56
Bosque de pino-encino	602.2			7.25	184		97.66	48.84			939.95
Matorral Crasicaule									393.14	223.41	616.55
Pastizal inducido		7.32	174.54	597.68			1925	57.69			2762.23
Agricultura de temporal	70.64	31.28	158.26	112.12	8.31		14.94	5054		36.82	5486.37
Zona Urbana	1054.23		31.38	63.22			500.16	1309.88	3289	22.38	6270.25
Bosque cultivado											0
TOTAL	2801.64	275.6	7135.36	8108.1	200	0	3084.2	6787	3698.4	282.61	32372.6

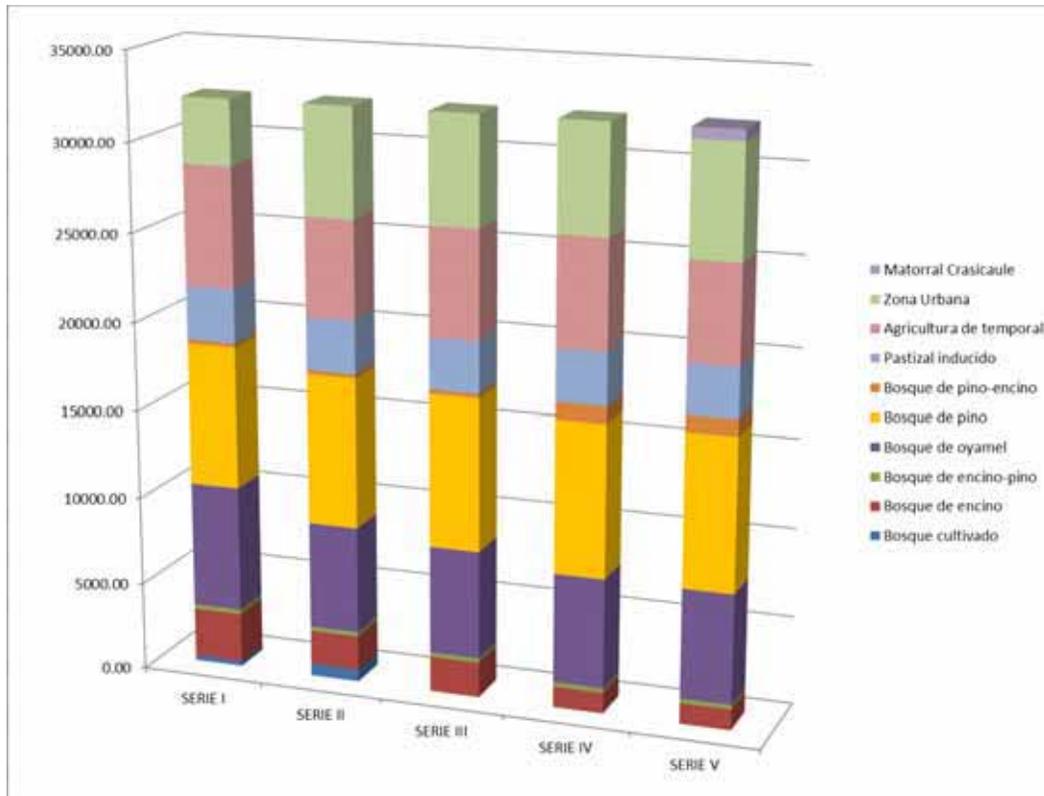


Figura 29. Superficie (ha) de acuerdo al tipo de vegetación y uso de suelo entre las diferentes series.



Figura 30. Pérdidas y ganancias de superficie (ha) por categoría.

Matorral crasicaule

El polígono que está clasificado como matorral crasicaule en la serie V, está en la superficie de Ciudad Universitaria (figura 31), en las series III y IV estaba clasificado como agricultura de temporal, en las serie II y I estaba denominado como bosque de cultivo (figura 54). El polígono de este tipo de vegetación es de 616 ha (1.9%).

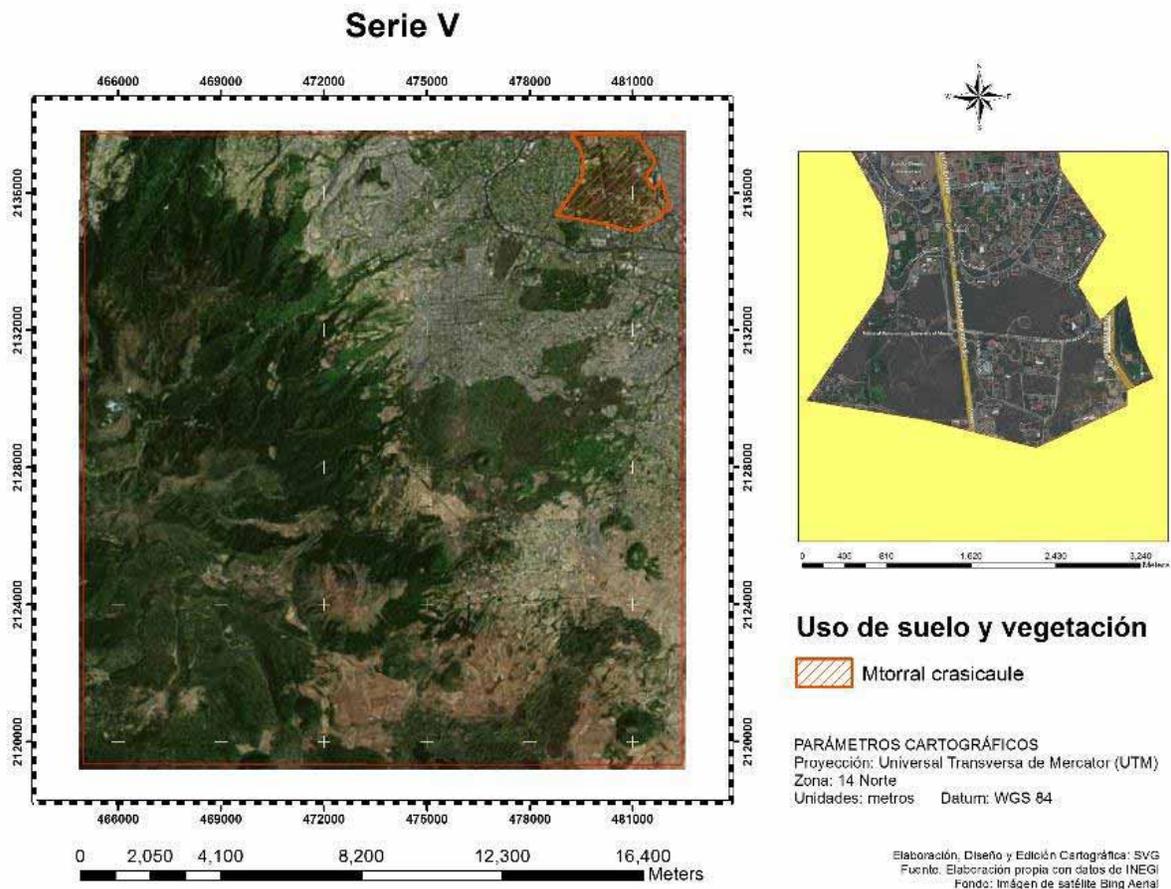


Figura 31. Polígono clasificado como matorral crasicaule en 2011.

Agricultura de temporal

A partir de la serie III a los polígonos que habían sido clasificados como uso de suelo para agricultura de temporal, en la columna de tipo de vegetación se colocó la leyenda de “no disponible” sin embargo, la información complementaria señala que son polígonos con actividad agrícola, por lo que se conservó su clasificación. En la serie I se reporta que 6,791 ha (21%) eran utilizadas para esta actividad y para la serie V disminuyó a 5,490 ha (17%) (Figuras 32 y 33), las 1,301 ha que se perdieron pasaron a zona urbana (figura 58).



Figura 32. Superficie (ha) con uso de suelo como agricultura de temporal.

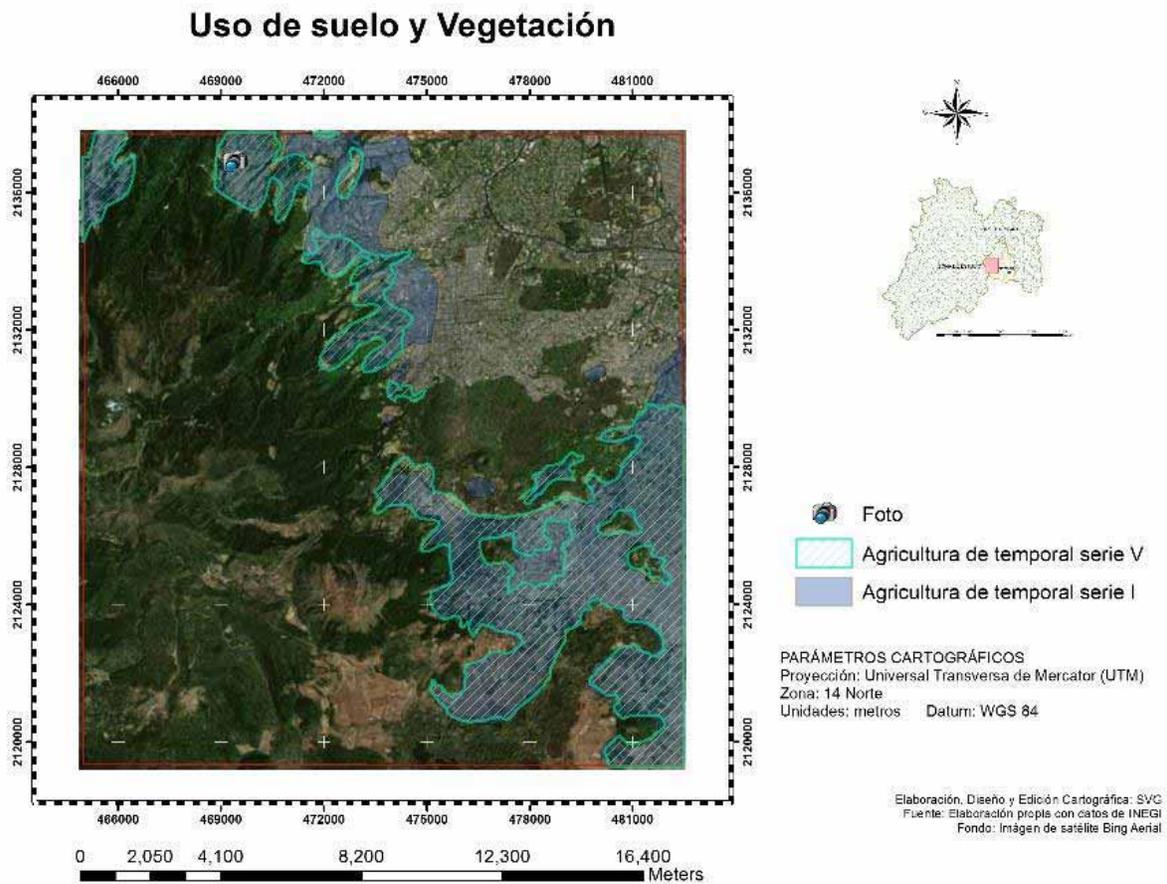


Figura 33. Cambios en la superficie de agricultura de temporal entre la serie I y V.



Figura 34. Agricultura de temporal en límite con zona urbana (LN 19° 19.5' LW 99° 17.5' 2800 msnm).

Si bien, el presente trabajo sólo se hizo comparando dos series de uso de suelo, se puede observar una tendencia de pérdida de uso agrícola a urbano desde los 70 a la fecha. De acuerdo a las referencias, el cambio de la ocupación de terrenos que eran utilizados para la agricultura por infraestructura urbana, puede tener muchas explicaciones sociales y económicas. Como ejemplo de lo anterior se puede considerar la falta de interés de los descendientes de los propietarios en cultivar la tierra, así como su situación económica, en general pobre, migración, oferta de estas tierras a un bajo costo para el desarrollo inmobiliario, entre otras. Dichas variables tienen que ser estudiadas y verificadas por expertos en las distintas disciplinas para asociarlas con el crecimiento urbano, pero de manera general se puede ver esta tendencia en los centros rurales cercanos a zonas de cultivo.

Así mismo puede tener explicaciones biofísicas debido a los usos y costumbres en la siembra que en ocasiones causan contaminación o pérdida de nutrientes en los suelos, lo que conlleva a perder su productividad (García, 2008). Esto coincide con lo reportado por el Instituto de Geografía de la UNAM y el INE (2006) quienes mencionan que en la Delegación Tlalpan de 1995 al 2005, la agricultura de temporal con cultivos anuales siguió una tendencia decreciente: de 8,958 pasó a 8,446 ha. Además, señalan que el incremento en la superficie urbana se dio por el establecimiento en terrenos agrícolas. Estos autores mencionan que al perder la rentabilidad de la agricultura, los ejidatarios venden sus terrenos y se establecen ranchos o clubes hípicas.

Pastizal inducido

En la serie I se tenían contabilizadas 3,068 hectáreas (9.5%) como pastizal inducido y para la serie V disminuyeron 322 ha que pasaron a tener un uso de suelo urbano (figura 58), quedando 2,746 ha (8.5%) (figuras 35 y 36).



Figura 35. Superficie (ha) con uso de suelo como pastizal inducido.

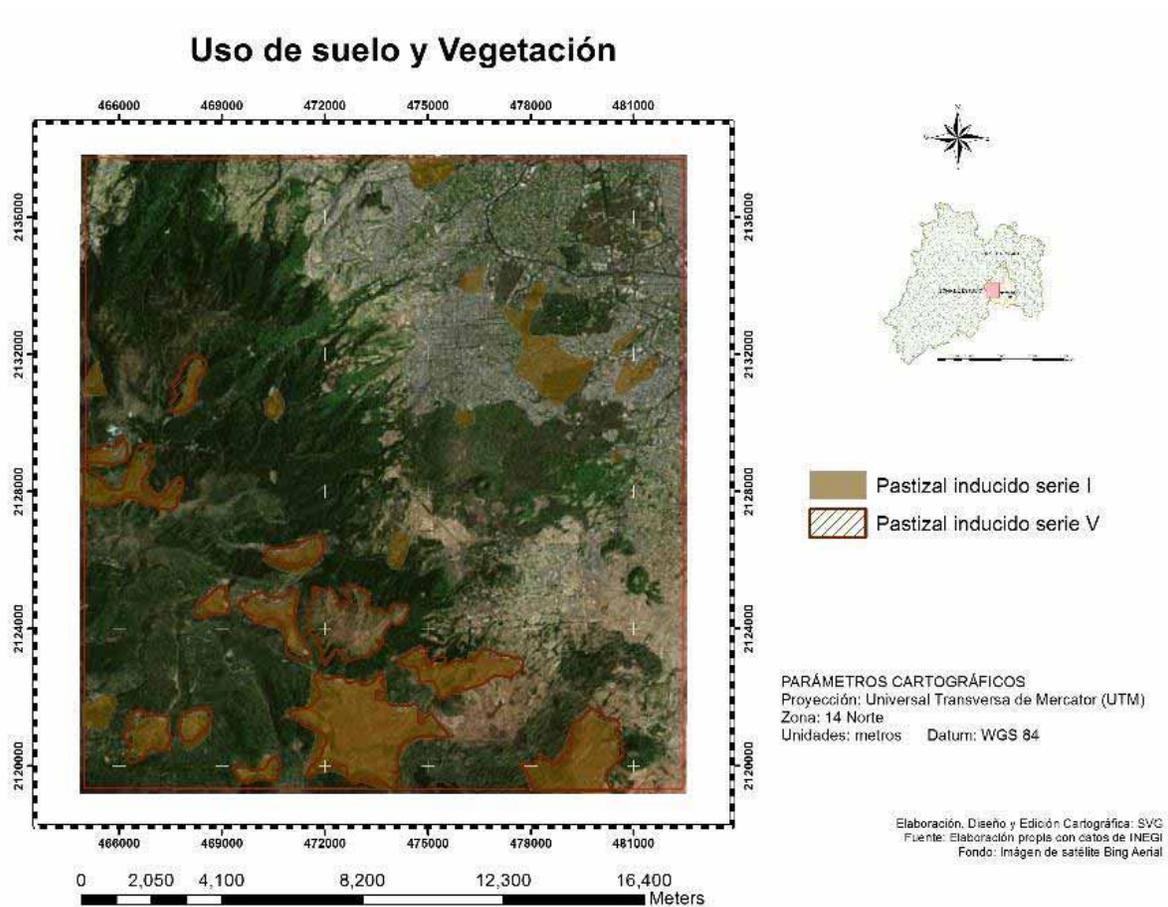


Figura 36. Cambios en la superficie de pastizal inducido entre la serie I y V.



Figura 37. Pastizal inducido.

Bosque pino-encino

La superficie ocupada por esta comunidad vegetal aumentó 4.6 veces (741 ha), ya que en la serie I se contabilizaron 201 hectáreas y para la serie V se tienen 942 ha (3%) (Figura 38). Gran parte de la superficie que estaba clasificada como bosque de encino en la serie I, en la serie V se clasificó como bosque de pino-encino (figura 52). Esto quizá pueda deberse a que se hallan sembrado pinos en el bosque de encino o simplemente la comunidad se mezcló con las demás especies.

Esta comunidad también fue ubicada en la superficie que anteriormente era pastizal inducido o agricultura de temporal (figura 39). En la siguiente figura puede observarse que durante las primeras tres series se mantuvo la superficie de este tipo de vegetación y a partir de la serie IV una mayor superficie se clasifica dentro de esta categoría.

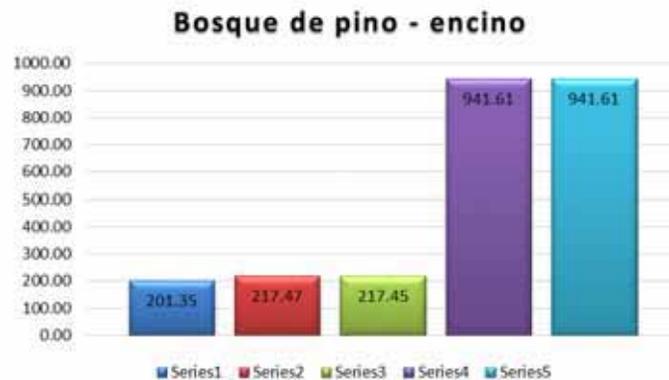


Figura 38. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de pino-encino.

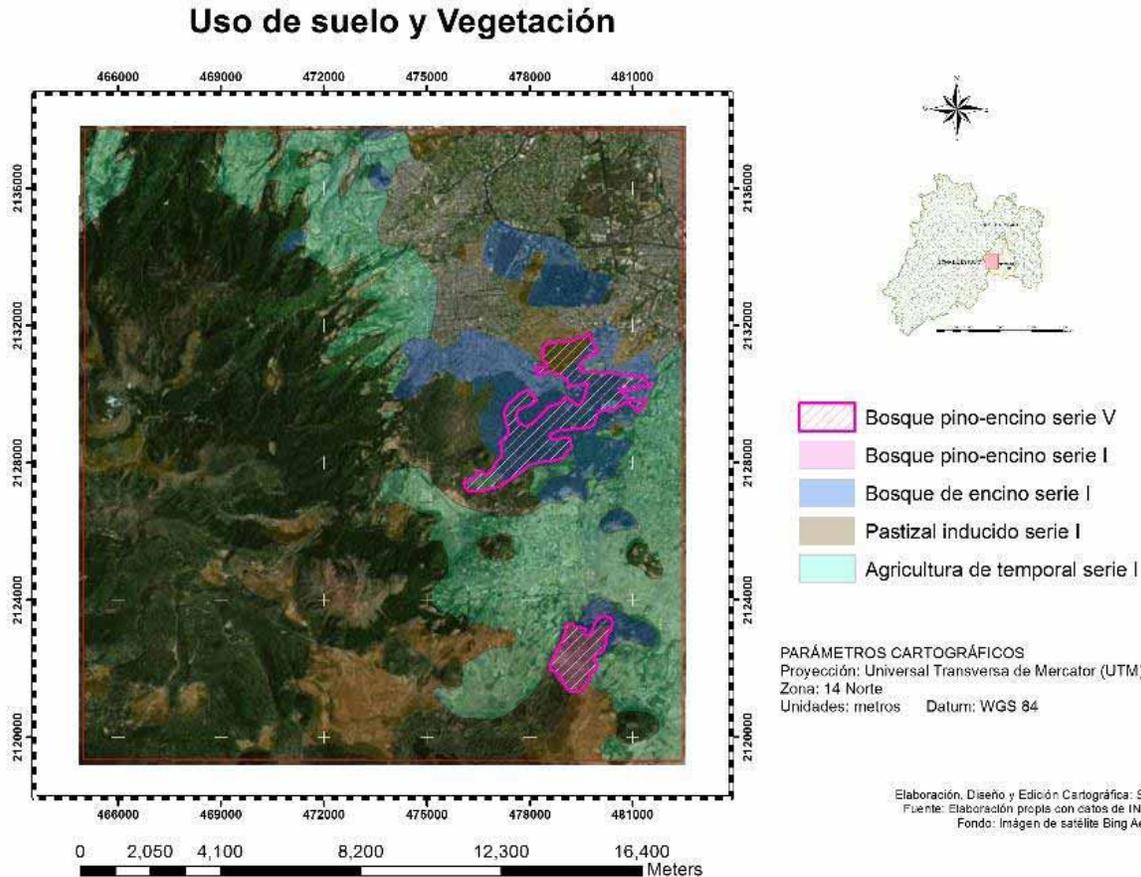


Figura 39. Cambios en la superficie de bosque de pino-encino entre la serie I y V.

Bosque de pino

La superficie de esta comunidad de acuerdo a la información del INEGI a partir de la serie III mostró un cambio, de la serie I a la V parte del bosque que estaba clasificado como bosque de oyamel pasó a bosque de pino y también ciertas superficies se convirtieron en áreas de pastizal (541 ha) y agricultura de temporal (18.7 ha) (figura 58). De acuerdo a lo observado en campo, en el límite de bosque de oyamel y bosque de pino, parecieran dominar los oyameles, aunque también se perciben algunas plántulas de pino (figuras 43, 44 y 45). Además también una pequeña superficie cambio a zona urbana (62.7 ha) (figura 58).



Figura 40. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de pino.



Figura 41. Bosque de pino (LN 19° 13' y LW 99° 16' 3400 msnm).

El bosque de pino en la zona de estudio se distribuye entre los 2,800 y 3,600 msnm, y si bien, no se realizó un estudio detallado acerca de la estructura de la vegetación de dicho ecosistema, se tiene la referencia de que el bosque de pino crece principalmente en zonas montañosas, en climas templados, fríos y subhúmedos, así como en suelos ácidos y medianamente profundos (POETEM). Usualmente se distribuyen por debajo de los 2,800 msnm, sin embargo en altitudes mayores a 3,500 msnm se encuentran masas puras y muy abiertas de *Pinus hartwegii*, ya que esta especie es resistente a condiciones de baja humedad y baja temperatura. En la Sierra de las Cruces, el estrato arbóreo está dominado por *P. occidentalis*, *P. teocote*, *P. leiophylla* y *Q. laurina* (PGOEDF).

Lo anterior podría explicar en cierta medida el crecimiento de la superficie de este tipo de vegetación entre las diferentes series.

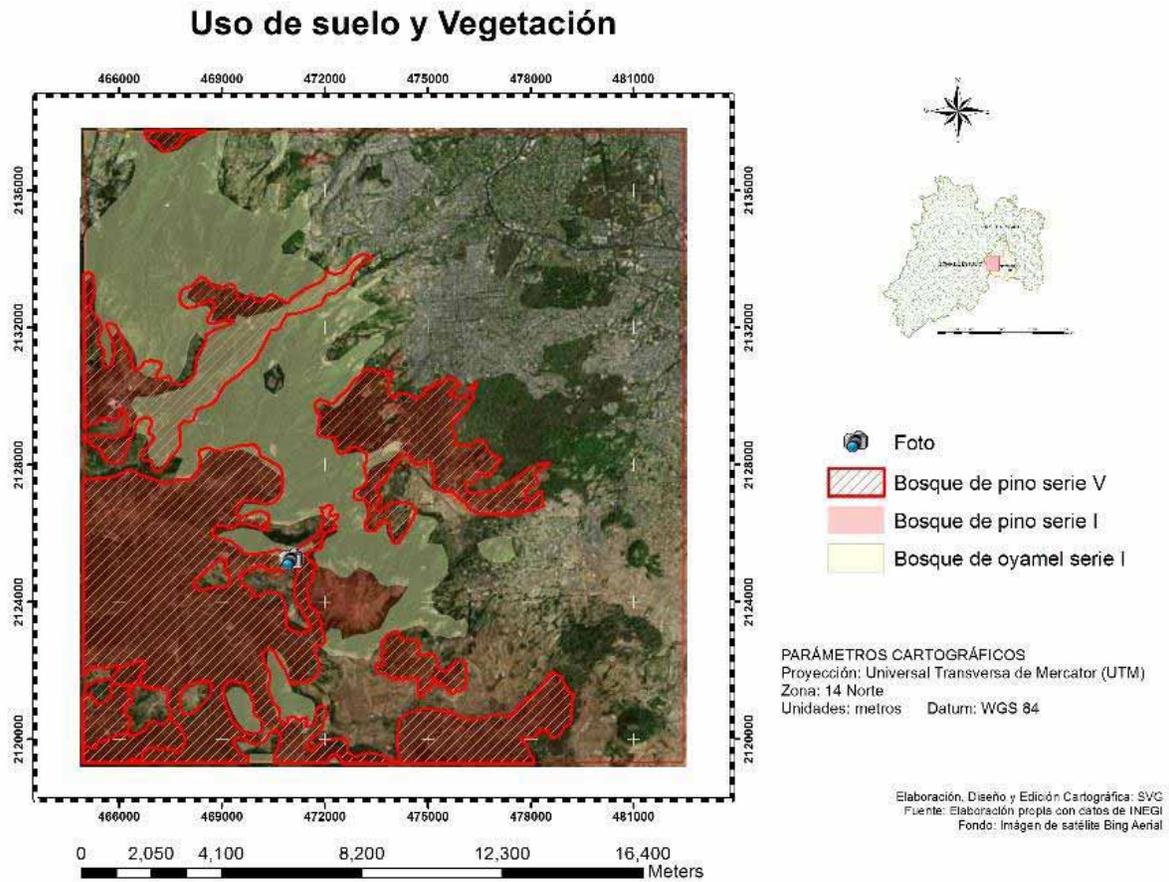


Figura 42. Cambios en la superficie de bosque de pino entre la serie I y V.



Figura 43. Límite de bosque de pino y oyamel (LN 19° 16.067' y LW 99° 17.56' 3000 msnm).



Figura 44. Plántula de oyamel a la izquierda y de pino a la derecha (coordenadas LN 19°15.85' y LW 99°17.65').

Bosque de oyamel

Esta comunidad vegetal disminuyó 922.98 ha de la serie I a la serie V, teniendo 7,123 (22%) y 6,200 ha (19%) respectivamente, de acuerdo a lo que se mencionó anteriormente, esta superficie fue reclasificada como bosque de pino en la serie V (figura 45). Además algunas superficies cambiaron a ser pastizal (192 ha), agricultura de temporal (138 ha) y zona urbana (32 ha) (figura 58).

En esta zona hubieron varios incendios durante la década de los noventa, lo cual afectó al ecosistema. Esta es la comunidad vegetal que predomina en el Parque Nacional Desierto de los Leones y los Dínamos. Estos parques cuentan con Programas de Manejo para su protección y conservación. Además de acuerdo al recorrido hecho en la zona, pueden observarse que el bosque se recupera ya que se ven plántulas de oyamel (*Abies religiosa*) y los árboles se ven vigorosos (figuras 46 y 47).

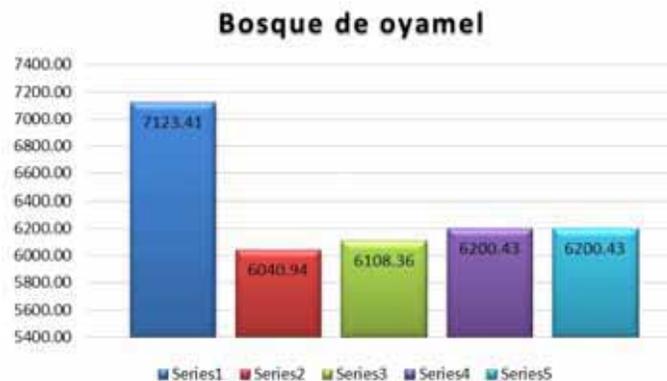


Figura 45. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de oyamel.



Figura 46. Hojas de oyamel (coordenadas LN 19° 18.68' y LW 99° 18.99').



Figura 47. Al fondo bosque de oyamel (coordenadas LN 19° 18.4' y LW 99° 18.71').

El bosque de oyamel en la zona de estudio está dentro de la cota de los 2,800 y 3,400 msnm y de acuerdo al POETEM crece en una altitud que va de los 2,500 a los 3,600 msnm, en climas húmedos, con una temperatura entre los 7 y 5°C con una precipitación media anual de 1,000 mm. Además dentro de la zona de estudio se encuentra la Sierra de las Cruces y la Sierra del Ajusco que presentan cuatro estratos, el estrato arbóreo puede presentar dos asociaciones: *Abies religiosa* - *Quercus sp.*, y *A. religiosa* – *Alnus firmifolia*; la primera ocurre en altitudes superiores a los 3,000 msnm (PGOEDF).

Así, el cambio de superficie entre el bosque de pino y de oyamel puede deberse a que ambas especies se distribuyen a la misma altitud y en climas similares. En ocasiones presentan asociaciones entre estas especies y con otras. Puede ser que el bosque de oyamel predominaba en el polígono clasificado de esa forma en la serie I y que posteriormente predominara más el bosque de pino.

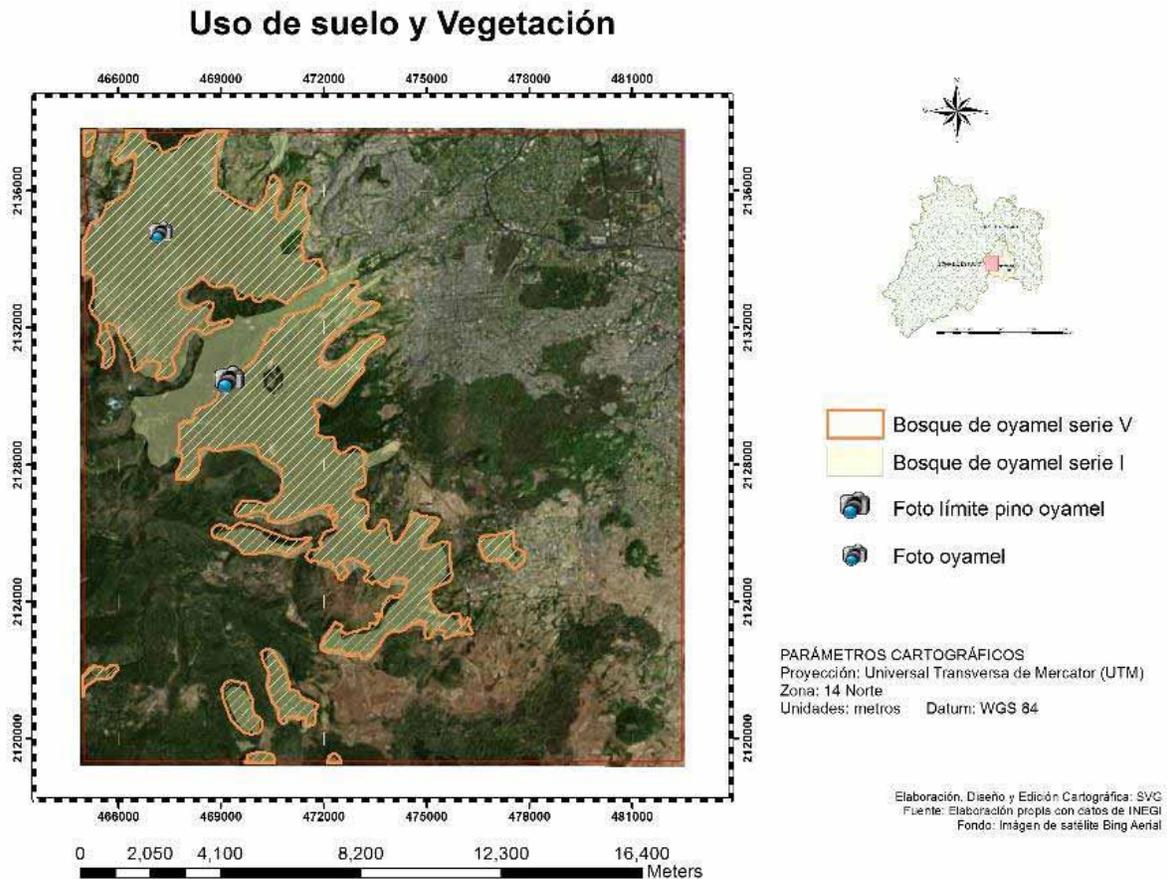


Figura 48. Cambios en la superficie de bosque de oyamel entre la serie I y V.

Bosque encino-pino

Esta asociación de especies perdió 19 ha de la serie I a la II, teniendo 281 ha y 262 ha respectivamente, de la serie II a la serie V la superficie se mantuvo muy constante (figura 49). Este ligero cambio de superficie puede deberse a un desfase entre ambas series, ya que como se mencionó anteriormente la serie I fue digitalizada de cartografía impresa y elaborada con una metodología diferente a las serie V (figura 50).

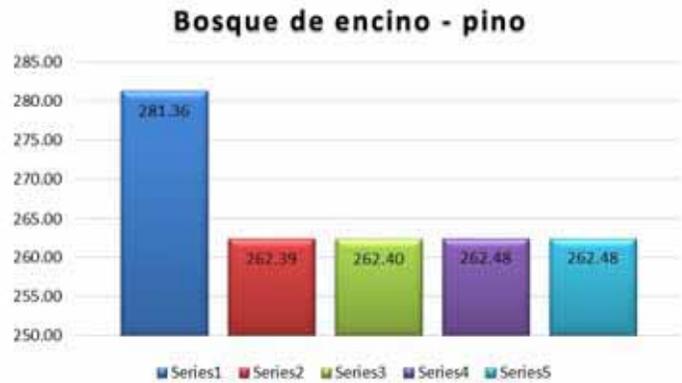


Figura 49. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de encino-pino

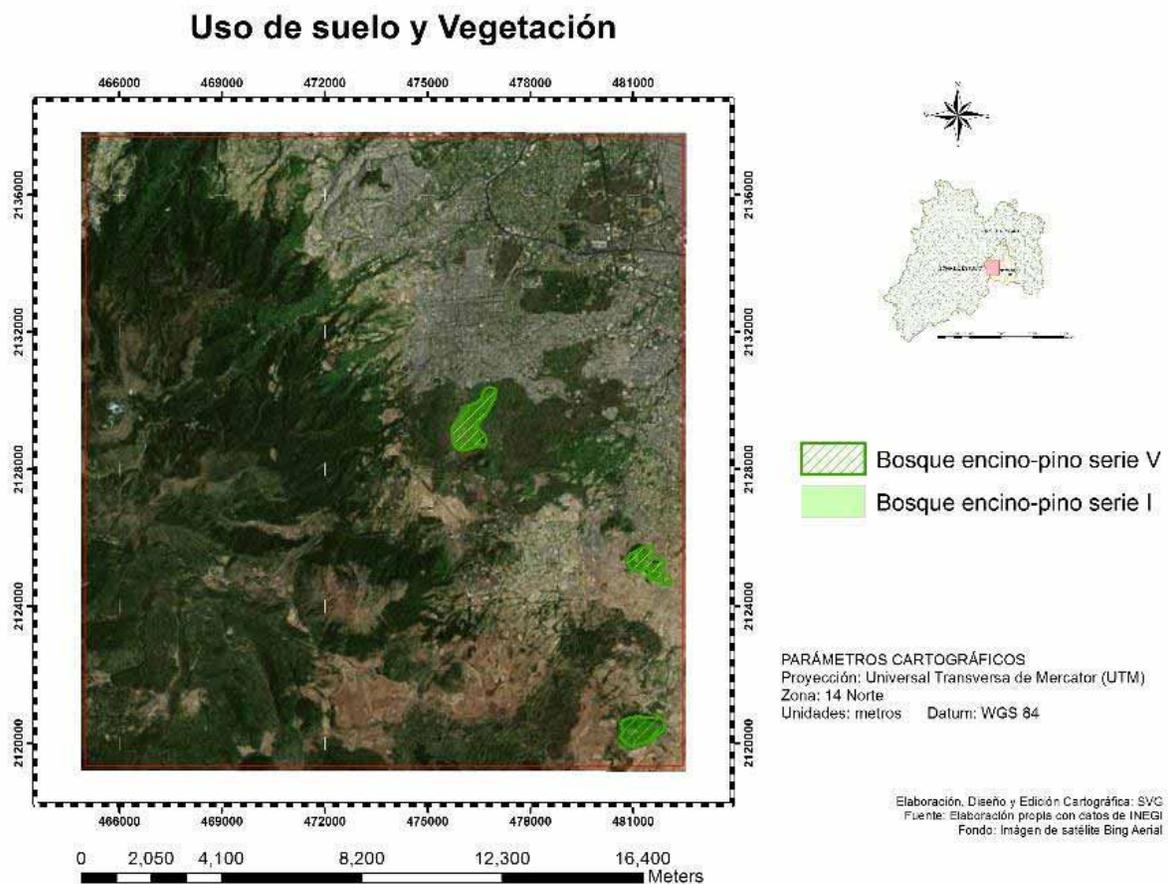


Figura 50. Cambios en la superficie de bosque de encino-pino entre la serie I y V.

Bosque de encino

El bosque de encino disminuyó más de la mitad, algunos de los polígonos fueron usados como zona urbana (1,042 ha 3.2%) (figura 58), se modificaron 1,623 ha entre la primera y la última serie teniendo 2,800 ha y 1177 ha respectivamente, el cambio mayor se observa de la serie III a la IV (figuras 51 y 52).



Figura 51. Superficie (ha) con uso de suelo como bosque de encino.

De acuerdo a Benítez et al. (1987) desde 1977, el bosque de encino ha sido el que ha perdido mayor superficie en la zona. Este bosque se caracteriza por la dominancia de especies de *Quercus* sp, crece sobre lavas gruesas y suelo escaso, comúnmente en exposición sur o suroeste a una altitud de entre los 2,500 y 2,800 msnm (PGOEDF). No tolera deficiencias de drenaje, escasa precipitación ni alta oscilación térmica. Se desarrolla en suelos con abundante hojarasca y materia orgánica, así como en suelos medianamente ácidos (pH 5.5 a 6.5) (POETEM). De acuerdo a lo anterior, la pérdida de este tipo de vegetación puede deberse a múltiples factores biofísicos: acidificación de los suelos, erosión, cambio en los patrones de lluvias y temperatura, o incendios, entre otros. Además, pueden existir factores económicos como el aprovechamiento forestal. Sin embargo, en este caso, la mayor superficie que perdió ésta asociación vegetal fue por la transformación a uso urbano (1,050 ha) debido en parte a su cercanía a zonas ya pobladas (figura 53).



Figura 52. Bosque de encino cercano a la zona urbana (LN 19° 40' LW 99° 10.3' 2200 msnm).

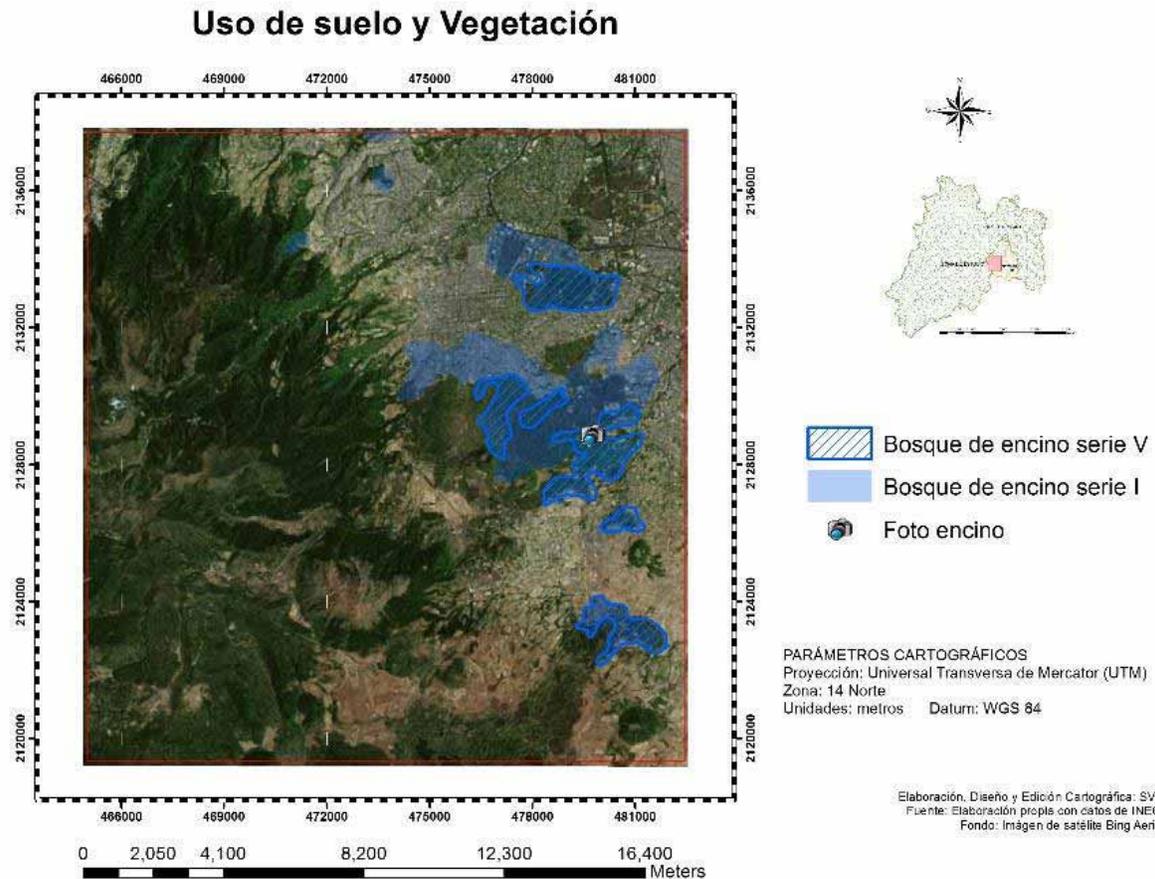


Figura 53. Cambios en la superficie de bosque de encino entre la serie I y V.

Bosque cultivado

Esta clasificación, solo está presente en las cartas de uso de suelo y vegetación de las series I y II, de acuerdo al diccionario de uso de suelo y vegetación versión 1, menciona que esta categoría estaba destinada para las comunidades con plantaciones de árboles establecidos con diferentes fines: uso forestal, control de erosión, recreación y otros más. A partir de la serie III, estos polígonos fueron clasificados como agricultura de temporal, y en la serie V, uno de los polígonos se clasificó como matorral crasicauale, pero en las imágenes de satélite estas zonas son una mezcla de infraestructura urbana y zonas de reserva ecológica en Ciudad Universitaria (figura 31).

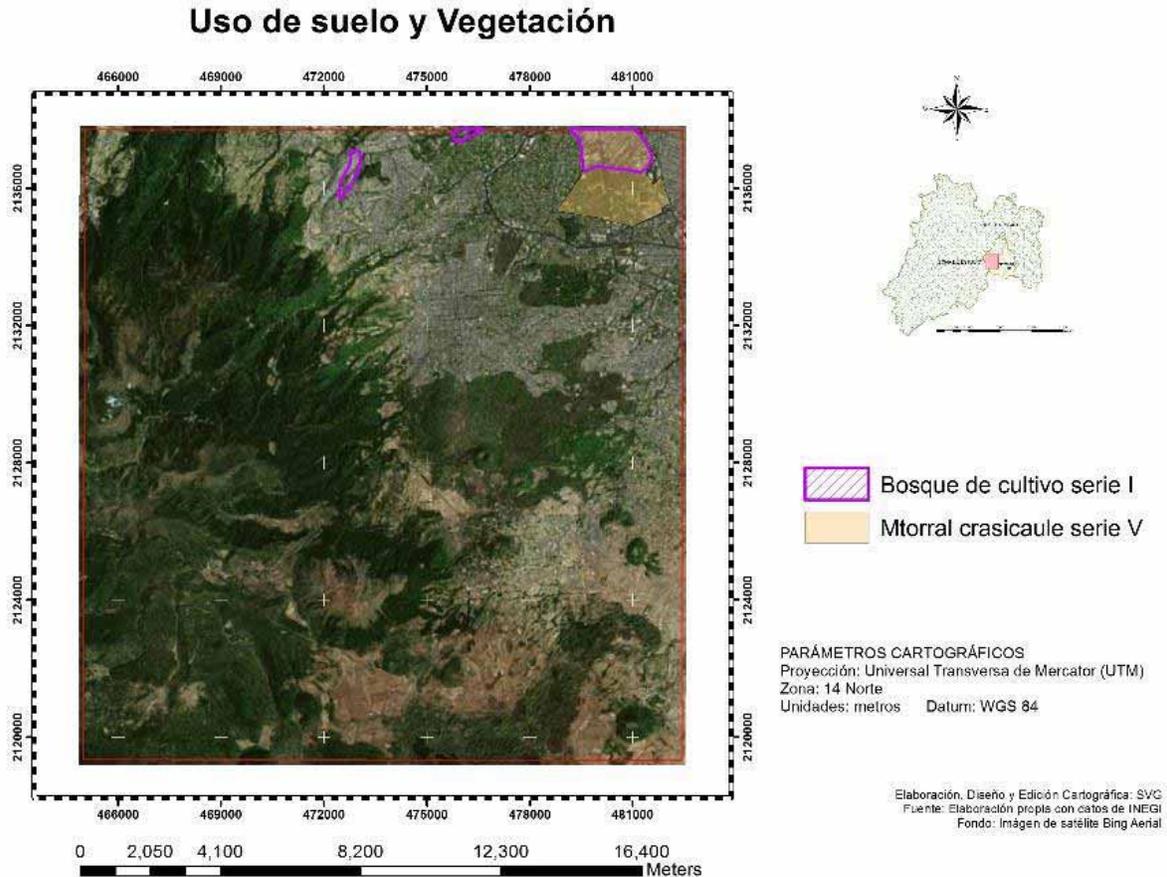


Figura 54. Cambios en la superficie de bosque de cultivo y matorral crasicaule.

IV.1.2. Crecimiento de la zona urbana de la serie I a la V

De acuerdo a lo reportado en la Serie I se definió un polígono con superficie de 3,691 ha (11.4%) clasificadas como zona urbana, en cambio para la serie V se definieron seis polígonos con una superficie total de 6,263 ha (19%) que significó un aumento de 1.6 veces (figura 55), pero la mancha urbana se mantuvo en el noreste del área de estudio (figura 56). Sin embargo, de acuerdo a la imagen de satélite "Landsat 8" de Diciembre de 2014, la superficie con alguna infraestructura urbana se encontró en diferentes polígonos que suman una superficie aproximada de 11,000 ha que representa el 36% de la superficie. Así mismo de acuerdo al INEGI las AGEB's urbanas en la zona de estudio abarcan una superficie de 10,474 ha (32%), existiendo una diferencia de 4,211 ha con respecto a lo reportado por la serie V, esto quiere decir que de acuerdo a lo indicado en la serie I, la zona urbana creció 2.8 veces en un período de casi 30 años (figura 56). De esta manera de 1984 a 2010, hubo un crecimiento de 323 ha por año. Este crecimiento ha afectado principalmente a la agricultura de temporal que fue el que mayor superficie cedió a esta categoría, seguida del bosque de encino (López y Plata 2009).

En la siguiente gráfica puede observarse los cambio de superficie de la serie I a la V, descritos anteriormente.

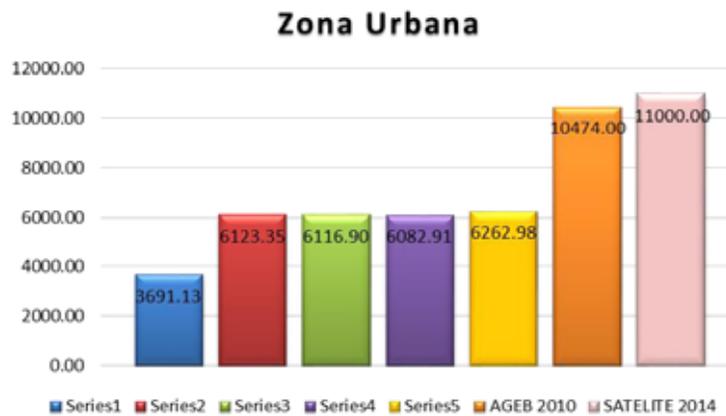


Figura 55. Superficie (ha) con uso de suelo de zona urbana.

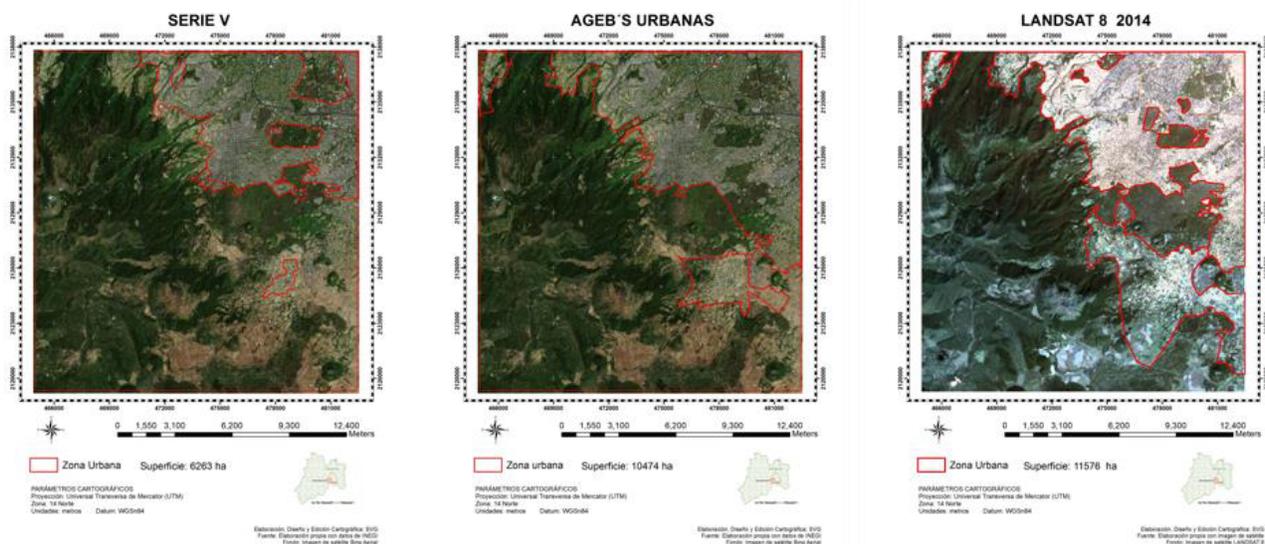


Figura 56. Polígonos clasificados como zona urbana de acuerdo a las diferentes fuentes (ver detalle en Anexo 2).

De acuerdo al análisis hecho hubo un cambio de uso de suelo de 2,971 ha (9 %) que estaban clasificadas como bosques o uso de suelo para agricultura y pastizal a zona urbana (figura 58) la comunidad vegetal que perdió más superficie fue el bosque de encino con 1,042 ha (3 %).

La zona de estudio está ubicada dentro de la Delegación Tlalpan donde a su vez se ubican los poblados de San Miguel Topilejo, San Tomas y San Miguel Ajusco, en los cuales en una década (1995-2005) se incrementó en 428 ha la superficie urbana (IG, UNAM y INE, 2006). Lo anterior refleja el crecimiento que se presentó en la zona en las últimas décadas.

Así mismo casi tres cuartas partes de la zona de estudio están consideradas como suelo de conservación. Según el Instituto de Geografía de la UNAM y el INE (2006) sobre dicha superficie se han identificaron tres tipos principales de urbanización: primero, la urbanización que propicia el crecimiento de los poblados tradicionales; segundo, una urbanización difusa sobre el perímetro del suelo de conservación; y tercero, la construcción dentro de ANP con aptitud distinta a la urbanización. De esta manera, se deteriora el ambiente, además de poner en riesgo la seguridad de las personas que habitan en estos sitios (IG, UNAM y INE, 2006).

El crecimiento urbano en el DF se ha dado sobre el suelo de conservación de manera difusa, con ocupaciones de baja densidad en todas las laderas de la Sierra de Chichinautzin (IG, UNAM y INE, 2006). En la zona de estudio puede observarse este tipo de crecimiento con los asentamientos irregulares que reporta la PAOT (figura 13) que son pequeñas superficies aisladas las unas de las otras. El problema es que estos asentamientos conforme pasa el tiempo dan lugar a la formación de núcleos más grandes de población.

El mayor crecimiento urbano se dio en la década de los noventas. De acuerdo al Programa Delegacional de Tlalpan, la tendencia de crecimiento continúa desde los 50. En 1990 la urbe creció hacia el sur poniente de esta delegación en poblados como San Miguel Ajusco y San Miguel Topilejo. En el período de 1990-1995 la tasa de crecimiento de vivienda fue de 2.19% en el Distrito Federal (Decreto. No. 904, 2010). Además se considera que la superficie urbanizada de la Zona Metropolitana del Valle de México pasó de 700 km² en 1950 a 1,500 km² en 1990. La población del DF disminuyó su tasa promedio anual del quinquenio de 1990-1995 de 0.5 % a 0.32% en el quinquenio de 1995-2000, esto se debió principalmente al saldo neto migratorio. Entre 1970 y 1990 las Delegaciones Magdalena Contreras, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco fueron las que recibieron mayor población (Decreto, 2003). En este período se puede observar que hubo un crecimiento de la ZMVM y que su tasa poblacional disminuyó, pero aun así se da un mayor crecimiento en las delegaciones del sur, que es donde se ubica la zona de estudio. Esto marca una tendencia de crecimiento periférico en la zona urbana y semi-rural (IG, UNAM y INE, 2006).

Además, hay que considerar que durante la década de los 90's hubo una fuerte devaluación y se firmó el TLC, lo cual sin duda influyó en la economía del país y en la distribución de la población. La zona céntrica del DF dejó de ser poblada, más bien la superficie urbana creció hacia los nuevos desarrollos inmobiliarios en la periferia aumentando la densidad de la población en los municipios del Estado de México más cercanos al DF. Así para el año 2000 la proporción de la población que vivía en la zona centro del DF disminuyó al 48%. Lo anterior conllevó a un aumento en las tasas de crecimiento de los municipios del Estado de México. Si bien la zona de estudio está ubicada mayormente en el DF, esta zona es parte de la periferia de la zona céntrica por lo cual se explica su crecimiento en las últimas décadas (Aguilar, 2002).

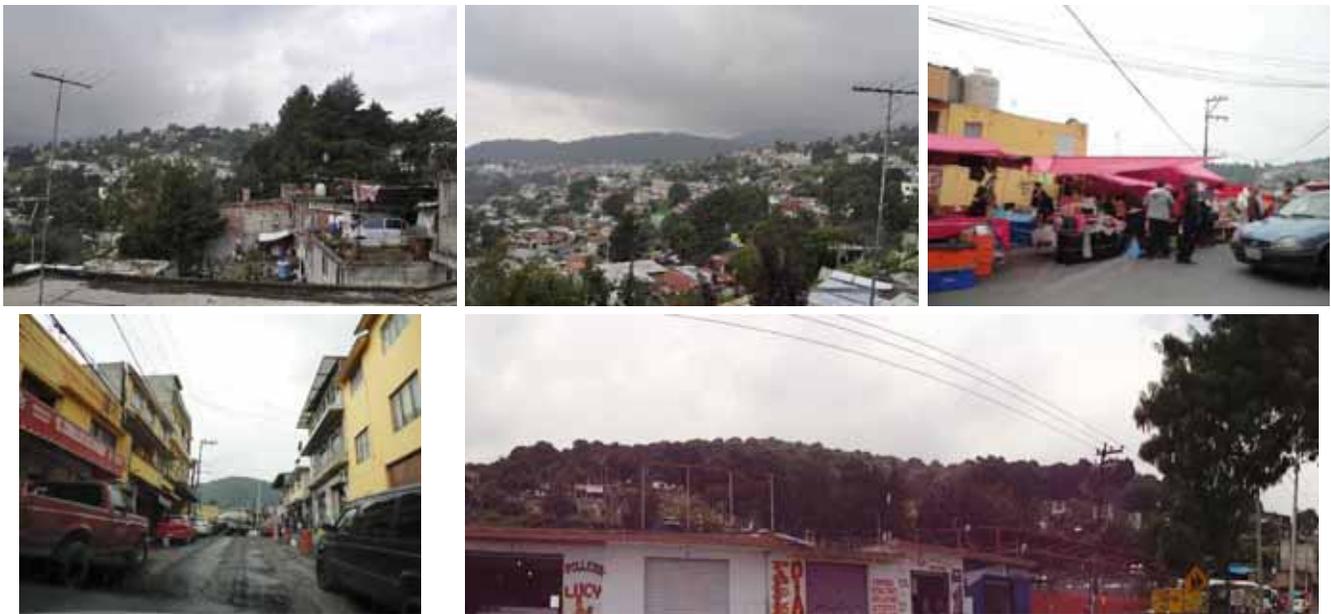


Figura 57. Zona urbana en recorrido 2015 en la zona de estudio.

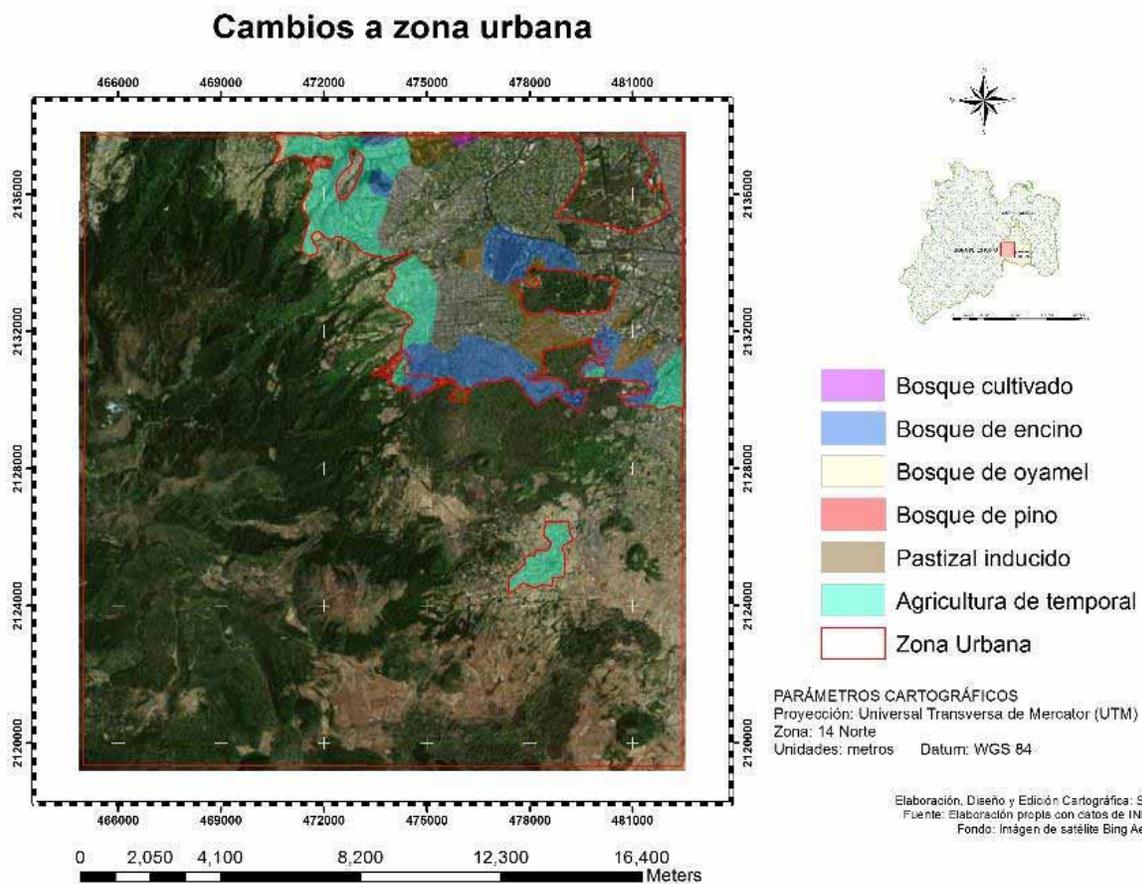


Figura 58. Superficies donde hubo cambio de uso de suelo a zona urbana.

IV.1.3. Modelo de crecimiento urbano y variables que influyeron

Se decidió trabajar con cuatro modelos para la construcción de los escenarios por medio de la ecuación de regresión logística, que fueron los que tuvieron un ajuste promedio alto, es decir el valor calculado con respecto al esperado es muy similar.

El **escenario 1** fue obtenido por medio del método “pasos atrás” con un 40% de los datos. Las variables independientes consideradas fueron: altitud, distancia a cuerpos de agua, a vialidades, a corrientes, orientación y las variables categóricas tipo de suelo, tipo de roca y cobertura de suelo. Presentó un ajuste promedio del 93% (Prueba de Hosmer y Lemeshow). Un porcentaje de varianza explicada a través de R^2 de Nagelkerke fue de 0.58 que indica un ajuste global del modelo moderado, además la R^2 de Cox y Snell dio un valor de 0.262.

El **escenario 2** se construyó con el 40% de los datos por medio del método “introducir” usando todas las variables menos el tipo de rocas, el tipo de suelo y la distancia a corrientes. Presentó un ajuste promedio del 93.2% (Prueba de Hosmer y Lemeshow). Un porcentaje de varianza explicada a través de R^2 de Nagelkerke fue de 0.56 que indica un ajuste global del modelo moderado, además la R^2 de Cox y Snell dio un valor de 0.259.

El **escenario 3** se construyó con el 40% de los datos por medio del método “introducir” usando todas las variables menos el tipo de rocas. Presentó un ajuste promedio del 93.4% (Prueba de Hosmer y Lemeshow). Un porcentaje de varianza explicada a través de R^2 de Nagelkerke fue de 0.64 que indica un ajuste global del modelo moderado, además la R^2 de Cox y Snell dio un valor de 0.296.

El **escenario 4** se construyó con el 40% de los datos por medio del método “pasos adelante” con las variables distancia a zona urbana, pendiente y las variables categóricas tipo de roca, tipo de suelo y cobertura de suelo. Presentó un ajuste promedio del 93.4% (Prueba de Hosmer y Lemeshow). Un porcentaje de varianza explicada a través de R^2 de Nagelkerke fue de 0.657 que indica un ajuste global del modelo moderado, además la R^2 de Cox y Snell dio un valor de 0.30.

Todos los escenarios fueron comparados con la superficie urbana que creció de la serie I a la V. Se obtuvieron los siguientes índices de correlación:

Tabla 8. Valores de correlación entre los escenarios.

ESEENARIO	INDICE KAPPA	INDICE CRAMER'S	ROC
1	0.49	0.50	0.87
2	0.45	0.48	0.85
3	0.51	0.52	0.87
4	0.52	0.54	0.84

Como puede observarse en la tabla 8, los índices de Kappa y Cramer's tienen un ajuste moderado y son muy similares entre los cuatro escenarios. El índice ROC tiene un mejor valor de correlación y de la misma forma es muy similar en todos los escenarios.

En las figuras 59 y 60 se puede observar que las superficies con mayor probabilidad (tono rojizo) de ser urbanizadas son las que están cercanas a los núcleos de población ya existentes, y que la tendencia sigue dándose hacia el suroeste del Distrito Federal y al noreste de la zona de interés.

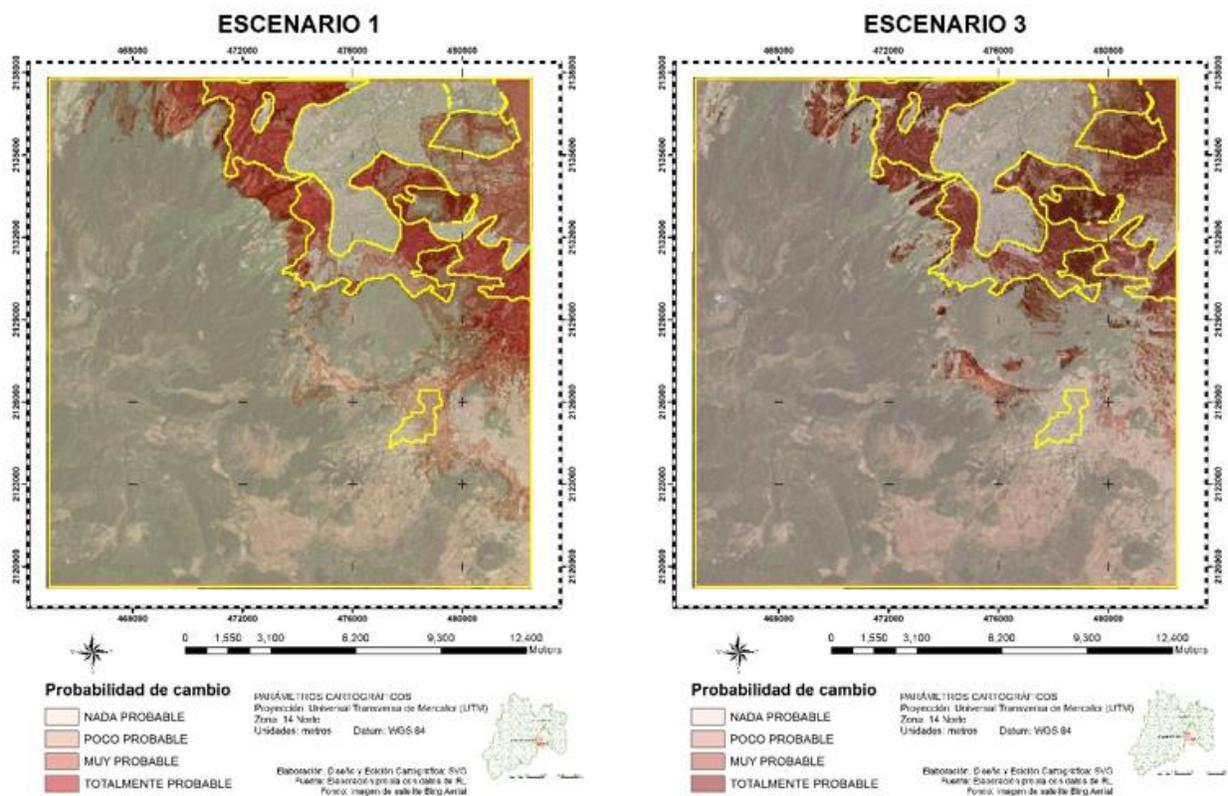


Figura 59. Escenarios 1 y 3 contruidos en base a la ecuación de regresión logística (ver detalle en anexo 3).

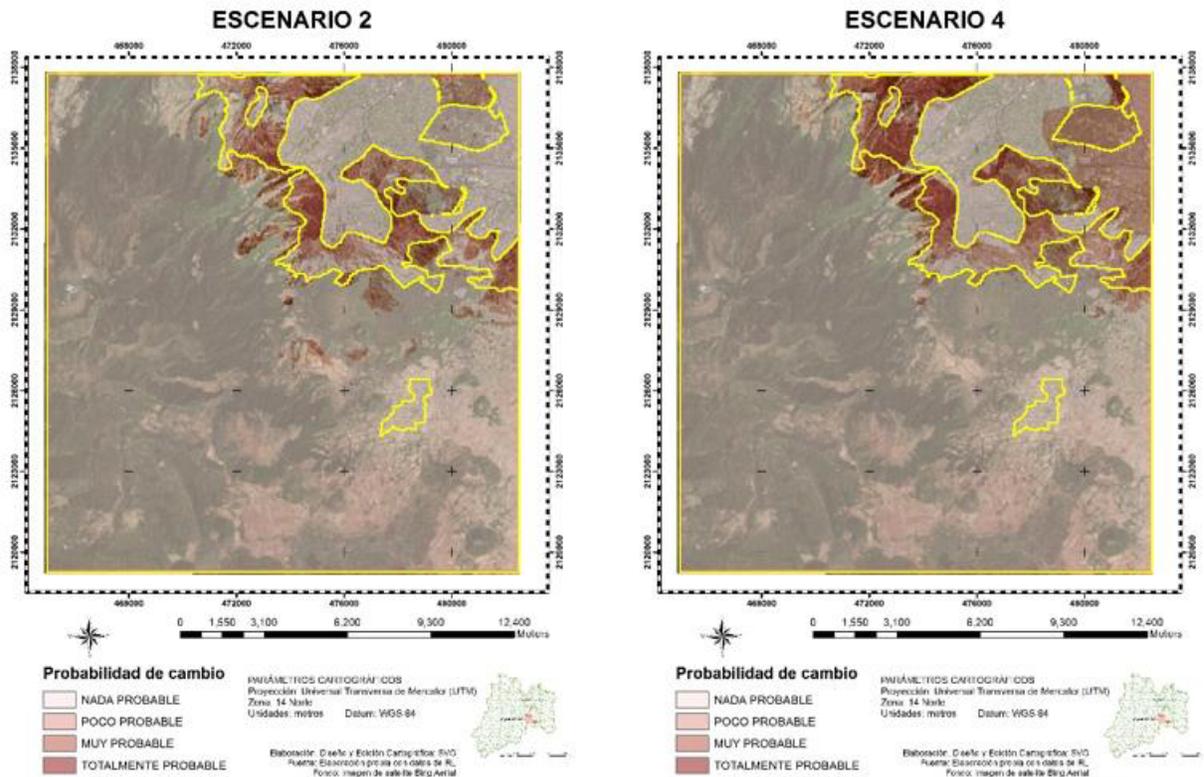


Figura 60. Escenarios 2 y 4 construidos en base a la ecuación de regresión logística (ver detalle en anexo 3).

Los escenarios 1 y 3 (figura 59) son los que presentan mayor superficie con probabilidad de ser urbanizada, la cual coincide en cierta medida con las zonas que INEGI reporta con uso de suelo urbano. Entonces se puede considerar que las variables: orientación, altitud, pendiente, distancia a corrientes y cuerpos de agua, distancia a la red vial a zona urbana, tipo de suelo, cobertura de suelo y tipo de roca (sólo en escenario 1) son las que tienen mayor influencia en el crecimiento urbano.

Además de acuerdo a los coeficientes obtenidos para cada variable y sus signos, se puede decir que en el caso del escenario 1 a menor altitud, más cercano a las vialidades, con una orientación hacia el Este, en un tipo de suelo clasificado como urbano y a su vez en zonas con uso de suelo de pastizal y cobertura de suelo con bosque de encino, además en un tipo de roca clasificada como suelo, son los sitios más idóneos para el establecimiento de la zona urbana.

De la misma forma, se tiene que para el escenario 3 -a menor distancia zonas urbanas- menor pendiente; los suelos de tipo feozem lúvicos y en superficies con uso de suelo para agricultura de temporal, son las más susceptibles a ser urbanizadas.

De acuerdo a los modelos construidos por regresión logística, las variables incluidas parecieran poder explicar hacia donde se está dando el crecimiento urbano en la zona.

En el caso de la orientación, el modelo indica que la urbanización se da preferentemente en laderas hacia el Este, el índice de correlación es muy bajo por lo cual no se considera que influya mucho.

La pendiente sólo es considerada en uno de los modelos y presenta un índice de correlación bajo, pero indica que a menor pendiente, se pueden establecer mejor los centros urbanos, lo cual coincide con Hernández (2015) y Batisani y Yarnal (2009). Además, según el PGOEDF la zona urbana actualmente se desarrolla en una pendiente moderada de 0 a 16°. Recordando que el modelo sólo indica la probabilidad de establecimiento de zonas urbanas en dichas áreas, es necesario observar que en la realidad las zonas urbanas se establecen en algunos lugares con pendientes muy pronunciadas con alto riesgo de derrumbe. Esto quizá pueda deberse a que la sociedad tiene la necesidad de una vivienda y en ocasiones no sabe que está ubicada en una zona de riesgo. Durante el recorrido por la zona, se observó el establecimiento de las viviendas sobre las laderas de los cerros (figura 57).

La altitud tiene un índice de correlación bajo y negativo, lo cual indica que las zonas con menor altitud son las más aptas para el establecimiento de viviendas (Batisani y Yarnal 2009; Amuzurrutia-Valenzuela et al. 2015). Si bien la zona urbana comenzó estableciéndose en el Valle de México, la mancha urbana ha ido creciendo hacia las zonas montañosas. En la zona de estudio los poblados están establecidos desde los 2,400 hasta los 3,000 msnm y el PGOEDF señala que la zona urbana está establecida en los 2,578 msnm promedio. Por lo tanto, el límite altitudinal es mayor en esta zona que en los valles (figura 6).

La distancia a corrientes y cuerpos de agua tienen un valor muy bajo de correlación tendiendo a cero (Batisani y Yarnal 2009). De acuerdo a la imagen de satélite puede observarse el establecimiento de las zonas urbanas muy cercanas a las corrientes de agua. Aunque de acuerdo a los datos de INEGI estas corrientes no tienen un alto flujo de agua y los cuerpos de agua son de condición perene o intermitente con una superficie máxima de 28 mil metros cuadrados, así como estanques (figura 7). En eventos meteorológicos adversos podría haber un desbordamiento y afectar las viviendas, lo cual implica un alto riesgo. Antiguamente las civilizaciones buscaban cuerpos y corrientes de agua para establecerse cerca de ellos y poder cubrir sus necesidades básicas, pero hacían obras de ingeniería que los protegían, tal como se sucedía en la antigua Tenochtitlan. Sin embargo, en la actualidad hay viviendas cerca de lechos de río sin ninguna protección.

La distancia a calles o en general a la red vial, de acuerdo al escenario 1 indica que a menor distancia, es más probable que se establezcan las zonas urbanas. De acuerdo al PGOEDF la urbanización debe darse en una distancia de 0 a 100 m de las vías de comunicación. Por lo general se busca el establecimiento de viviendas y demás infraestructura urbana en sitios que estén bien comunicados, puesto es necesario contar con una buena movilidad dentro y fuera de estas áreas. Sin embargo de acuerdo al INEGI muchos de los caminos trazados en la zona

de estudio están fuera de operación o en malas condiciones para su uso. Además la realidad es que muchas inmobiliarias buscan la compra de terrenos a precios bajos sin importar si estos cuentan con vías de comunicación cercanas o en buena condición y en el caso de zonas que fueron de uso agrícola y que se urbanizaron la construcción de calles fue posterior a esto. Así que la existencia o no de redes de comunicación, no condiciona el establecimiento de las zonas urbanas.

De acuerdo al escenario 3, hay una baja correlación entre la distancia a la zona urbana y el crecimiento de la ciudad pero la tendencia es que a menor distancia de los poblados, habrá mayor urbanización. Aguilera (2006) señala que de 1970 a 1984 en la Ciudad de Granada existió un alta correlación entre estas variables, debido a que en este período el crecimiento era generalmente por la agregación a los núcleos ya existentes y para los años de 1984 a 1990 la relación disminuyó puesto que el crecimiento en el área metropolitana fue menos continuo. Como se mencionó anteriormente, la zona está creciendo de forma dispersa (Aguilar, 2002). Por el tipo de crecimiento que se está presentando en la zona, la superficie urbana no necesariamente va a crecer a un lado de los grandes núcleos de población. Por otro lado, el PGOEDF estableció que las áreas que estén a una distancia de 0 a 200 m de los poblados, son las zonas más aptas para urbanizarse.

De acuerdo al escenario 1 el tipo de suelo de feozem lúvico es el que presenta mayor correlación con la zona urbana, esto quiere decir que en las zonas con este tipo de suelo es más probable que pueda urbanizarse. Los feozem son suelos que cuando son profundos se encuentran en zonas planas y son utilizados para agricultura de riego y temporal (INEGI, 2004). Pudiera ser que estas zonas con el tiempo sean abandonadas y ocupadas para el establecimiento de viviendas, sin embargo, el PGOEDF señala que la zona urbana se estableció sobre los suelos feozem háplicos y adosoles húmicos.

El escenario 3 muestra una fuerte relación entre el uso de suelo de agricultura de temporal y el pastizal y una relación negativa con el bosque de oyamel y de pino. Es decir que de acuerdo a este modelo, hay mayores probabilidades de que se urbanicen los sitios con cobertura de pastizal y agricultura (Batisani y Yarnal 2009; García 2008) que las áreas boscosas. Esta información coincide con el PGOEDF el cual identificó que la ocupación urbana se dio sobre los campos de cultivo y pastizales. Lo ideal sería que las zonas boscosas se mantuvieran en buen estado por los servicios ambientales que proveen. Es importante no abandonar las zonas de cultivo y abrir nuevas en terrenos distintos, por lo que es esencial el uso de técnicas de agricultura sostenible. Las zonas de pastizales guardan una importancia económica por su uso para el pastoreo por lo que igualmente es importante conservarlas en buenas condiciones. Pero si es necesario el uso de estas tierras para el establecimiento urbano, sería importante establecer limitantes para el tipo de viviendas respetando siempre las condiciones ambientales del sitio.

El tipo de roca con mayor relación a la zona urbana es el tipo volcanoclástico, puesto que en la zona el volcán del Xitle hizo erupción en el pasado cubriendo gran parte del sur de la delegación Tlalapan Coyoacán y Alvaro Obregón (Siebe, 2009). De acuerdo al PGOEDF la superficie urbana del DF está establecida sobre brechas y tobas volcánicas. Por lo que hay mayor probabilidad que en este tipo de roca se dé el establecimiento de nuevas áreas urbanas.

Dentro de IDRISI se corrió el módulo de LOGISTICREG, usando como variable dependiente la superficie de crecimiento entre la Serie I y la V, como variables independientes se emplearon las mismas que en la regresión logística hecha en SPSS con un 40% de los datos. Este módulo arrojó como resultados la ecuación del modelo que es:

$$\begin{aligned} \text{logit}(\text{zona_u_1y5}) = & -0.5376 - 1.136E-04 * \text{mde_zonaes1} + 1.209E-04 * \text{DIST_CPO_AGUA} - \\ & 0.0049 * \text{DISTAN_CALLES} - 8.415E-05 * \text{DIST_CORRIEN} - 7.186E-04 * \text{DIST_ZONAURB1} + 1.930E- \\ & 04 * \text{orientacion} + 1.841E-04 * \text{pendiente} - 0.1663 * \text{ROCAS_COD} + 0.4373 * \text{EDAFO_COD} - \\ & 0.0720 * \text{USUE_1_CODI} \end{aligned}$$

Así como un ROC de 0.92 y una R² de 0.40, lo cual indicaría un ajuste muy bueno del modelo. De la misma manera, se comparó con la superficie urbana que creció entre las serie I y la V, encontrado unos índices de correlación moderados (Kappa 0.48 y Cramers's 0.51) (figura 61).

Para conocer qué variables eran las que más influían en el crecimiento urbano se calculó el índice ROC para cada variable independiente los cuales fueron:

Tabla 9. Índice de correlación (ROC).

VARIABLES	ROC
Cobertura de suelo	0.55
Orientación	0.57
Distancia a cuerpos de agua	0.62
Pendiente	0.65
Tipo de suelo	0.65
Distancia a corrientes	0.68
Distancia a red vial	0.74
Tipo de roca	0.77
Distancia a zona urbana	0.85
Altitud	0.86

Como se puede observar, las cinco variables con mayor influencia en el modelo fueron, la distancia a corrientes, a calles o vialidades, el tipo de roca, la distancia a zonas urbanas, y la altitud.

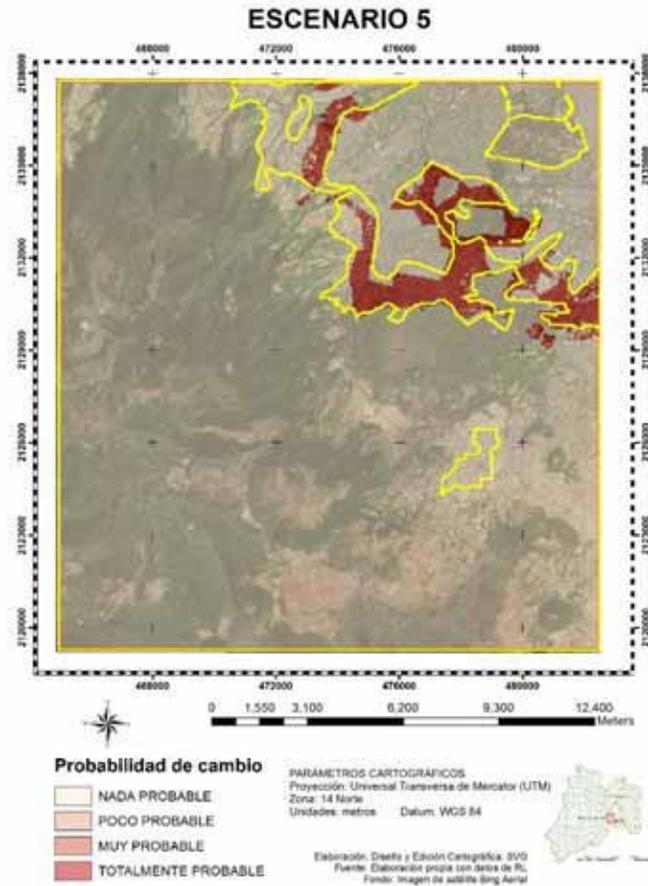


Figura 61. Escenario construido en base a la RL hecha en IDRISI.

Las variables consideradas en este estudio fueron algunas de las que la literatura ha utilizado para hacer estudios de crecimiento urbano, pero no son todas. Hace falta considerar las variables socioeconómicas que en este caso no se consideraron puesto que no se tiene la formación y experiencia para entender y explicar su influencia en el crecimiento urbano. Recordando que los resultados aquí obtenidos sólo marcan las zonas más probables de urbanización de acuerdo a un algoritmo matemático y no quiere decir que en la realidad el crecimiento se dé específicamente en esas zonas. Este modelo nos ayuda a dar una aproximación de la tendencia de urbanización en la zona de acuerdo a las variables consideradas.

IV.1.4. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo

Los escenarios que se obtuvieron por medio del método de cadenas de Markov fueron los siguientes:

Escenario 1

Se compararon las imágenes de USUE de las series I y III por medio de MARKOV y se obtuvo la matriz de áreas de transición. De acuerdo a este modelo hubo un cambio de 4,911 ha que estaban clasificadas con un uso diferente al urbano que pasaron a este uso (tabla 10).

Tabla 10. Superficie que cambio entre la Serie I y III.

	NO URBANO	URBANO
NO URBANO	21,306.8	4,911
URBANO	1,946.4	4,173

Dentro de IDRISI, se hizo el análisis comparativo entre la imagen con probabilidad de cobertura en zona urbana y la superficie de zona urbana de la serie V, las cuales tienen un alto valor de similitud (índice Kappa 0.82). Como puede observarse en la siguiente imagen, el límite de la zona urbana predicho tiene una buena coincidencia con el de la serie V, pero se predice que 1,855 ha más serían ocupadas para uso urbano en esa fecha (figura 62).

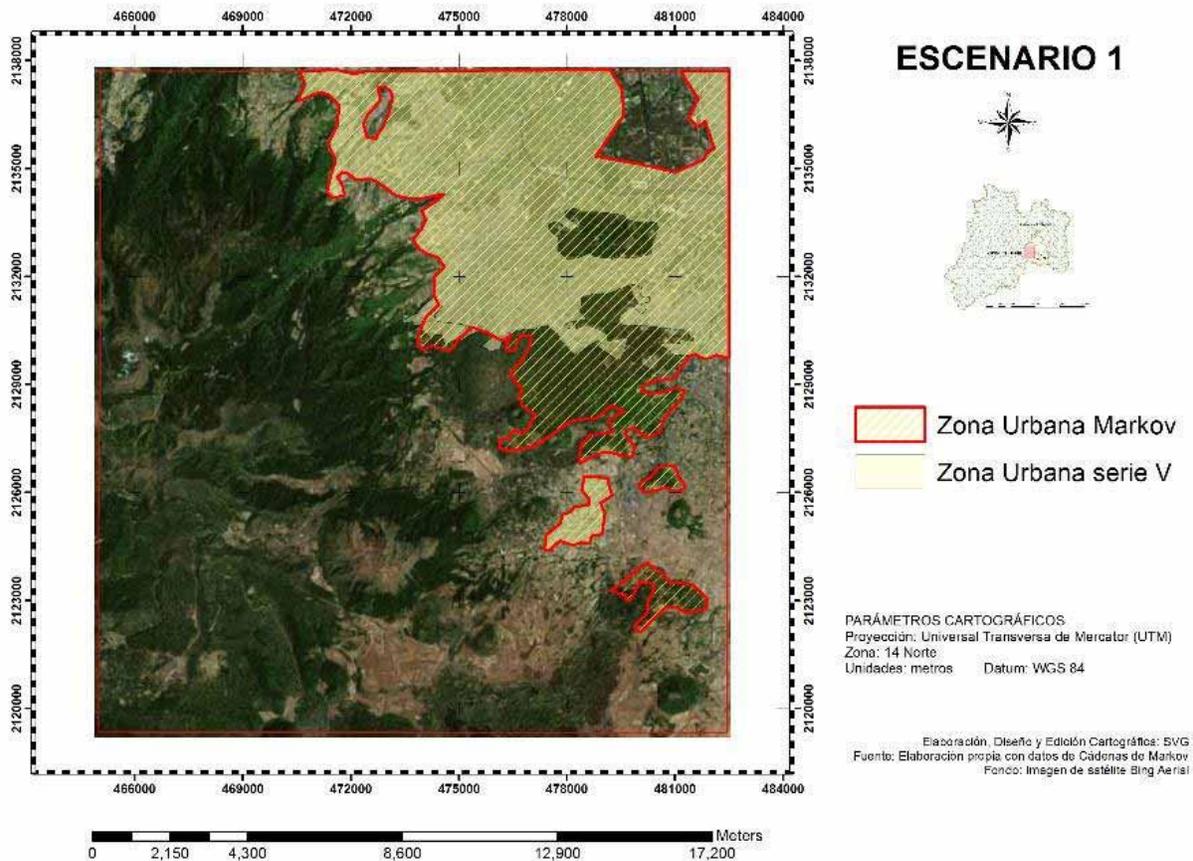


Figura 62. Escenario 1 construido en base a MARKOV

Escenario 2

Se construyó con las Series II y IV para pronosticar al 2011, recordando que esta fecha es la de la última serie publicada por INEGI, al comparar los polígonos de uso urbano de la serie V y la imagen de probabilidad se obtiene un alto valor de similitud (Kappa 0.98). Existe una diferencia de 180 ha entre ambas imágenes, puesto que el modelo no toma en cuenta el polígono existente en el sureste de la zona (figura 63).

De acuerdo a este modelo, hubo un cambio de 20.25 ha que estaban clasificadas con un uso diferente al urbano que pasaron a este uso (tabla 11).

Tabla 11. Superficie que cambio entre la Serie II y IV.

	NO URBANO	URBANO
NO URBANO	26,229.75	20.25
URBANO	17.25	6,070

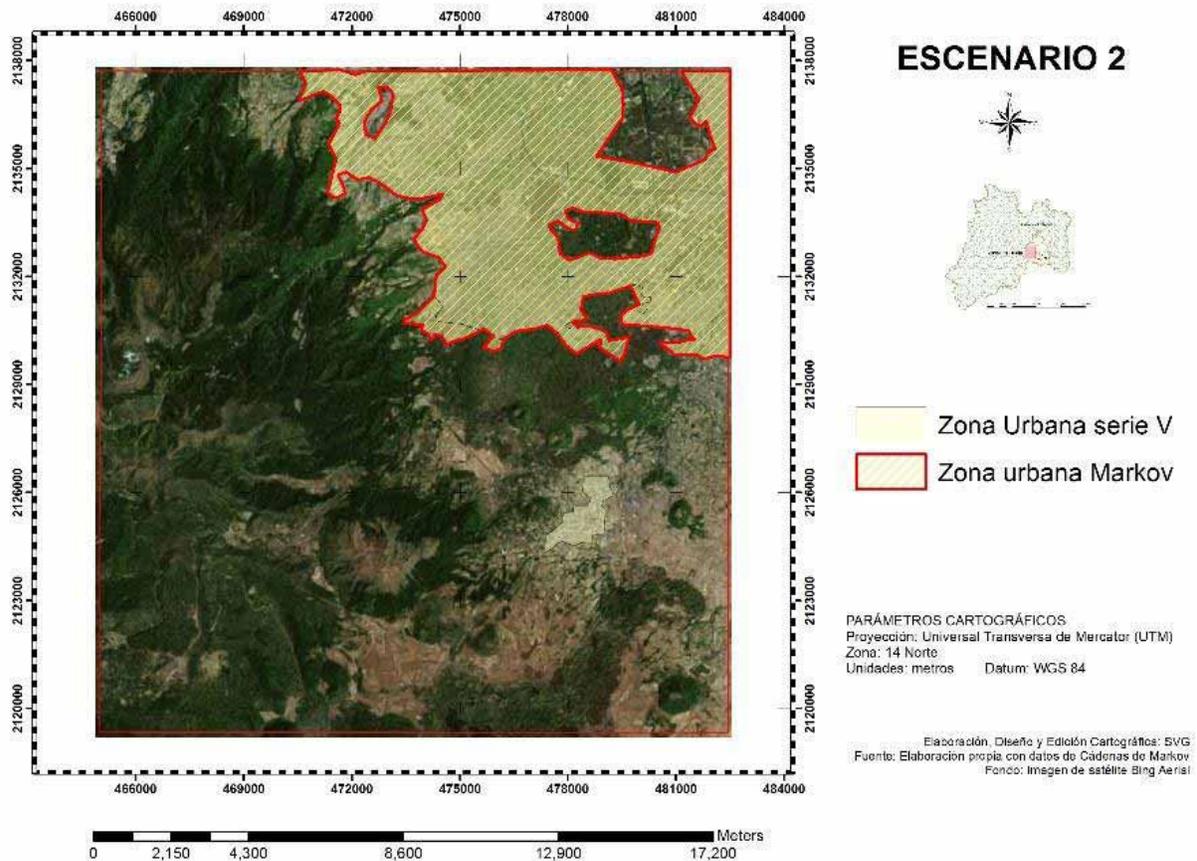


Figura 63. Escenario 2 construido en base a MARKOV.

De acuerdo a lo anterior, el modelo construido para el escenario 2 es el que mejor predice el crecimiento urbano de la zona, por lo que este fue el que se utilizó para generar los pronósticos a corto y mediano plazo.

Conforme a los cambios cronológicos que han existido en la zona desde los 70 a la fecha, se construyó un escenario que mostrará el crecimiento de la superficie urbana en el 2030. En la figura 64 se puede observar que no hay cambios aparentes entre la superficie pronosticada para dicho año y la publicada por INEGI para 2011. Lo mismo sucedió con el escenario simulado a 2045 (figura 64). Hay una diferencia de superficie de aproximadamente 550 ha que no considero el modelo y que en la serie V están contabilizadas como zonas urbanas.

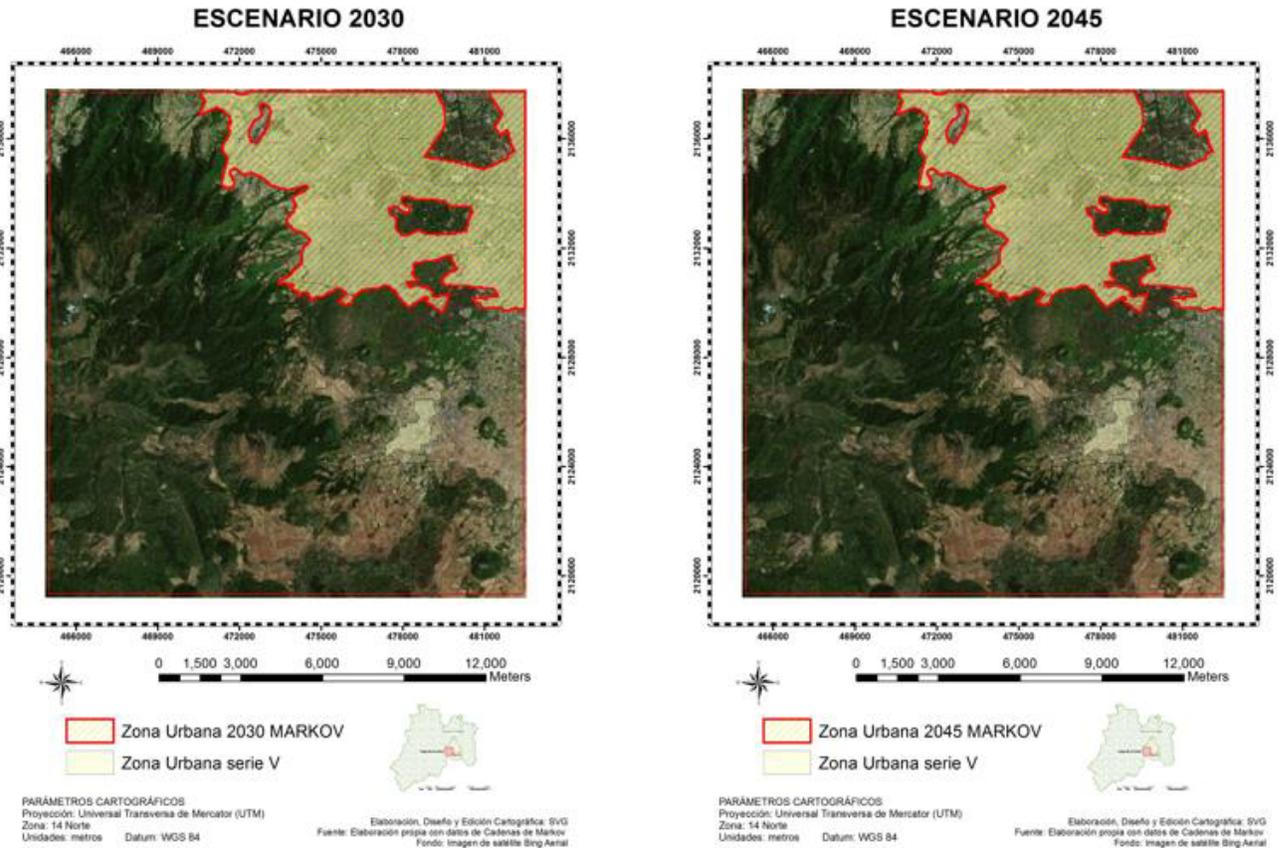


Figura 64. Escenarios pronosticados en base a MARKOV (ver detalle en anexo 4).

La metodología en la que se basa las cadenas de Markov ha sido utilizada en varios estudios para pronosticar el crecimiento urbano y cambios de cobertura del suelo (Hernández 2015; Gómez 2009, Camacho et al. 2015; Sandoval 2009; Guan et al. 2011 Paegelow et al. 2003; López et al. 2001; Moghadam y Helbich, 2013; García 2008; Akin et al. 2015) arrojando en algunos casos cambios drásticos en el crecimiento urbano.

Como ya se explicó anteriormente, la probabilidad de cambio de una superficie dada en un período establecido está condicionada por el estado inmediato anterior. El escenario construido con base a las series II y IV fue el que presento mejor ajuste al momento de la validación, esto quizá pueda deberse a que el crecimiento urbano de la serie II a la V fue prácticamente constante con una variación de ± 130 ha; en cambio de la serie I a la II hubo un crecimiento mucho mayor, casi del doble de superficie.

Los escenarios pronosticados para 2030 y 2045 tienen una superficie muy parecida a la de la serie V. Esto no quiere decir que no habrá cambios en la superficie urbanizada, lo que sucede es que el crecimiento urbano no sólo está condicionado por los usos de suelo que se han dado históricamente, hay más variables que lo influyen. Sandoval (2009) señala que las limitaciones del modelo de simulación obtenido por cadenas de Markov se debe a que el modelo determina

las probabilidades de cambio con base solamente en el análisis interno del sistema, sin tener en cuenta las variables explicativas y descriptivas, y recomienda usarlo en combinación con otras metodologías. López et al. (2001) concluyen que la información obtenida con las matrices de Markov de primer orden, permiten conocer cuáles son las categorías más atractivas para el crecimiento urbano y que de acuerdo a la prueba de contingencia χ^2 cuadrada se demostró el bajo poder predictivo del modelo markoviano en su estudio.

El crecimiento urbano tiene una dinámica diferente en cada momento y espacio y aunque en ocasiones se pueden observar tendencias, nada garantiza que su comportamiento será el mismo a lo largo del tiempo. Las cadenas de Markov nos ayudan a dar probabilidades de cambio en el sistema de acuerdo al comportamiento del mismo durante el tiempo, sin embargo como ya se mencionó hay n cantidad de variables que pudieran influir positiva o negativamente en el mismo.

IV.1.5. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo de acuerdo a ciertas variables (autómatas celulares y cadenas de Markov)

Escenario 1

El primer modelo se construyó usando como escenario base la carta de USUE de la serie I, la matriz de transición de áreas entre la serie I y la III, así como los mapas de aptitud construidos previamente fueron: aptitud de cobertura de suelo, roca, tipo de suelo y pendiente en grados de acuerdo a la literatura (Aguilera, 2006); pronosticando para un transcurso de 27 años contados, considerando que la serie I fue publicada en 1984 y se desea conocer el escenario de la serie V que fue publicada en 2011. Como filtro, se utilizaron los autómatas celulares estándar de 5 por 5.

De acuerdo al análisis estadístico, hay una similitud baja entre el polígono de zona urbana obtenido de este modelo y el polígono de la serie V (índice Kappa 0.60). Existe una diferencia de 2,566 ha entre ambos polígonos (figura 65).

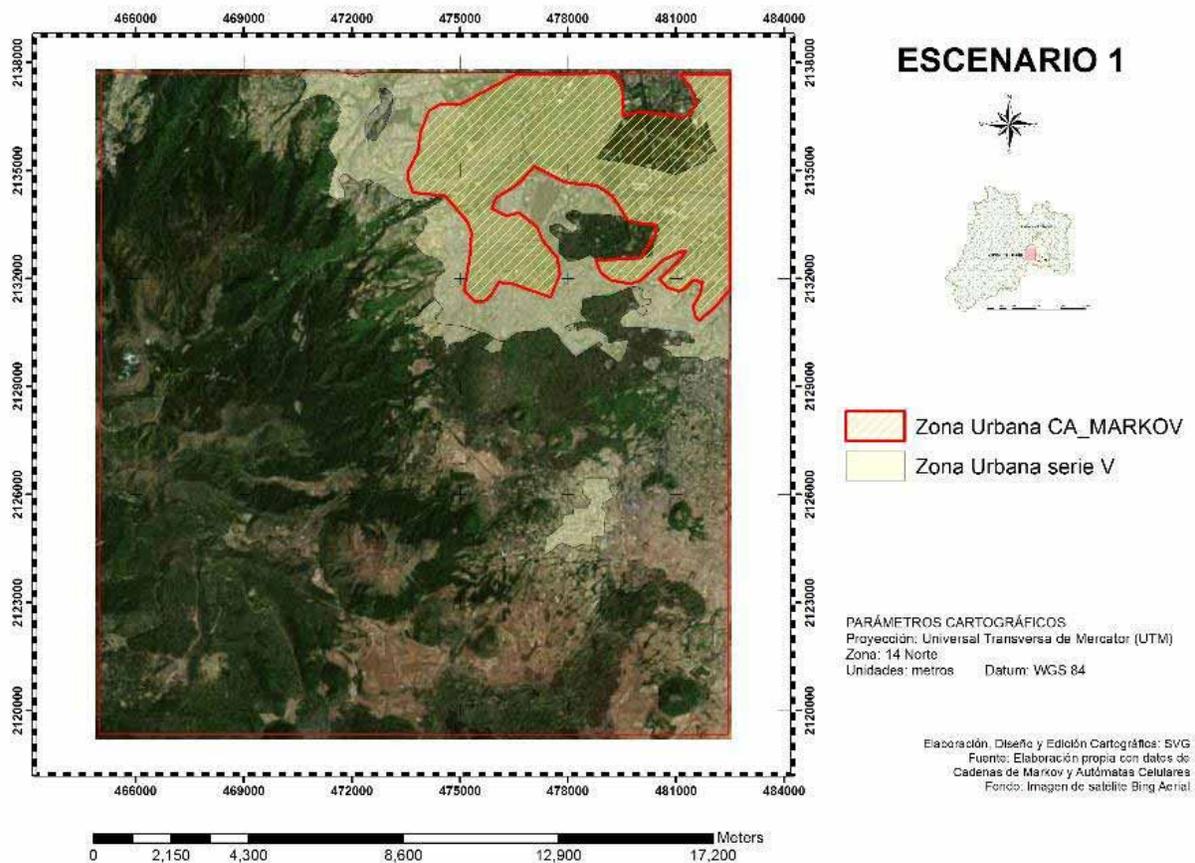


Figura 65. Escenario 1 construido en base a CA_MARKOV.

Escenario 2

El siguiente modelo fue construido con la carta de USUE de la serie II como escenario base, la matriz de transición de áreas entre las serie II y IV y los mismos mapas de aptitud, el pronóstico fue para 14 años considerando que la serie II fue publicada en 1997 y se desea conocer el escenario de la serie V que fue publicada en 2011. Como filtro, se utilizaron los autómatas celulares estándar de 5 por 5.

El análisis estadístico mostró una alta correlación entre la superficie pronosticada por el modelo y la zona urbana de la serie V (índice Kappa 0.97). La diferencia entre ambas superficies fue de 143 ha (figura 66).

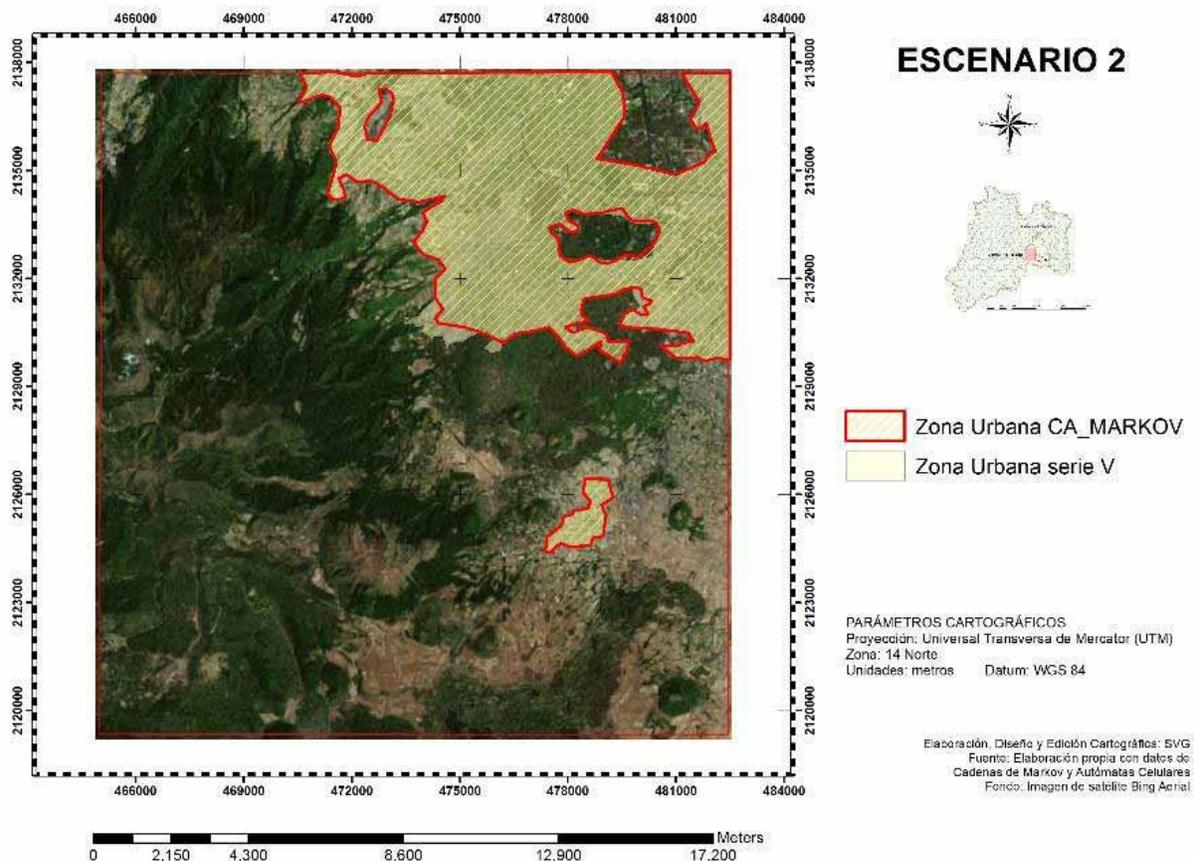


Figura 66. Escenario 2 construido en base a CA_MARKOV.

De acuerdo a lo anterior, el modelo construido para el escenario 2 es el que predijo mejor el crecimiento urbano de la zona, por lo que fue el que se utilizó para generar los escenarios a corto y mediano plazo.

Los escenarios construidos para el 2030 y 2045 son muy parecidos y coinciden en gran medida con la zona urbana de la Serie V (Kappa 0.97) con una diferencia de superficie de 612 ha (figura 67). Esto no quiere decir que no cambiara la superficie que actualmente se usa como urbana. Más bien quiere decir que no sólo los cambios históricos y las variables de cobertura de suelo, tipo de suelo, tipo de roca y pendiente son las que influyen en el crecimiento de la mancha urbana.

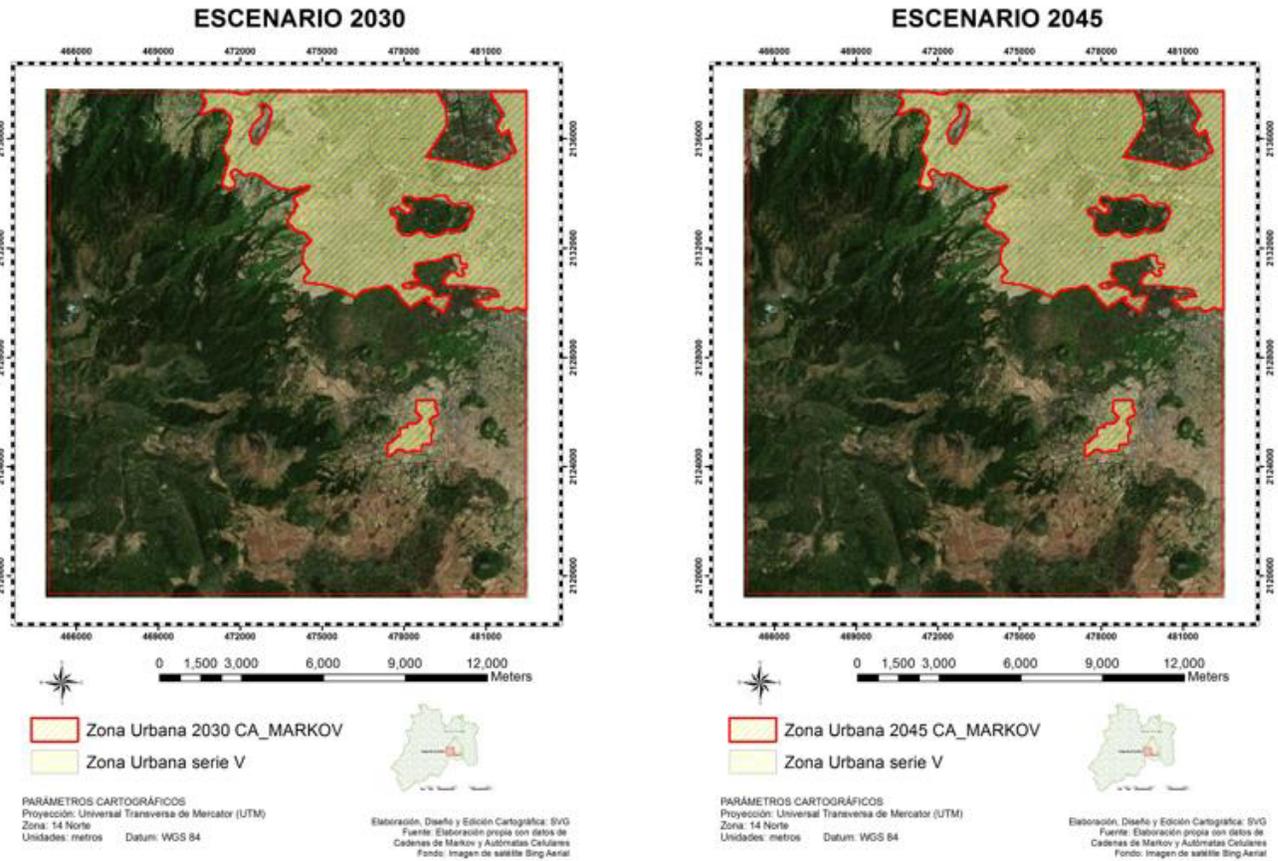


Figura 67. Escenarios pronosticados en base a CA_MARKOV (ver detalle en anexo 5).

Si bien las proyecciones hechas por estas metodologías se basan en algoritmos matemáticos, y el ajuste del modelo fue alto, no pronostica cambio alguno en el crecimiento de la mancha urbana. Lo cual no quiere decir que el modelo esté mal, simplemente son aproximaciones hechas en base a la información proporcionada al modelo. Como ya se mencionó, la dinámica urbana es muy cambiante, de tal forma que de un momento a otro puede existir un evento ya sea biofísico, social, económico o político que cambie la velocidad y forma de crecimiento de la zona.

Es importante reconocer que los modelos son una herramienta útil en la simulación de escenarios futuros, que nos ayudan a conocer ciertas tendencias, pero definitivamente la realidad de las grandes ciudades es que al ser tan diversas en todos los aspectos (políticos, culturales, sociales, económicos, físicos, biológicos y otros), estas tendencias no siempre se cumplen y es necesario establecer las políticas necesarias para regular la ocupación del suelo previniendo en la medida de lo posible el daño al ambiente.

Especialmente en esta zona que guarda un buen porcentaje de ecosistemas diversos con su respectiva importancia ambiental, social y económica, se debe propiciar un desarrollo urbano sostenible y bien planificado.

IV.1.6. Aptitud de uso de suelo urbano

Ponderación de variables

La ponderación y las variables a utilizar fueron definidas de acuerdo a las referencias (Molero et al. 2007; Rosa et al. 2010; Da Silva y Cardozo 2015; Henriquez y Qüense 2010), de esta manera se construyeron cuatro escenarios.

Como se mencionó, la ponderación se hizo en base a la técnica de Saaty, el programa IDRISI arroja un índice de correlación (kappa) que valida que tanta consistencia tiene el peso asignado a las variables, así se obtuvieron los siguientes índices para cada escenario.

Tabla 12. Índices de correlación de los escenarios.

Escenario	Índice Kappa
1	1.17
2	0.98
3	0.73
4	0.74

Escenario 1

Se realizó utilizando como factores la cobertura de suelo, pendiente, altitud, tipo de suelo, de roca, distancia a corrientes, a calles y a zonas urbanas, las cuales fueron previamente normalizadas. Se decidió construirlo con estas variables puesto que fueron las mismas utilizadas en la RL y que tuvieron alguna correlación con el establecimiento de la zona urbana (tabla 13). Como limitante se emplearon los polígonos de las áreas naturales protegidas y los cuerpos de agua.

La ponderación de las variables quedó de la siguiente manera:

Tabla 13. Peso de las variables consideradas para escenario 1.

Variable	Peso
Cobertura de suelo	0.1405
Pendiente	0.1156
Altitud	0.1095
Tipo de suelo	0.1449
Tipo de roca	0.0978
Distancia a corrientes	0.1387
Distancia a calles	0.1177
Distancia a asentamientos humanos	0.1353

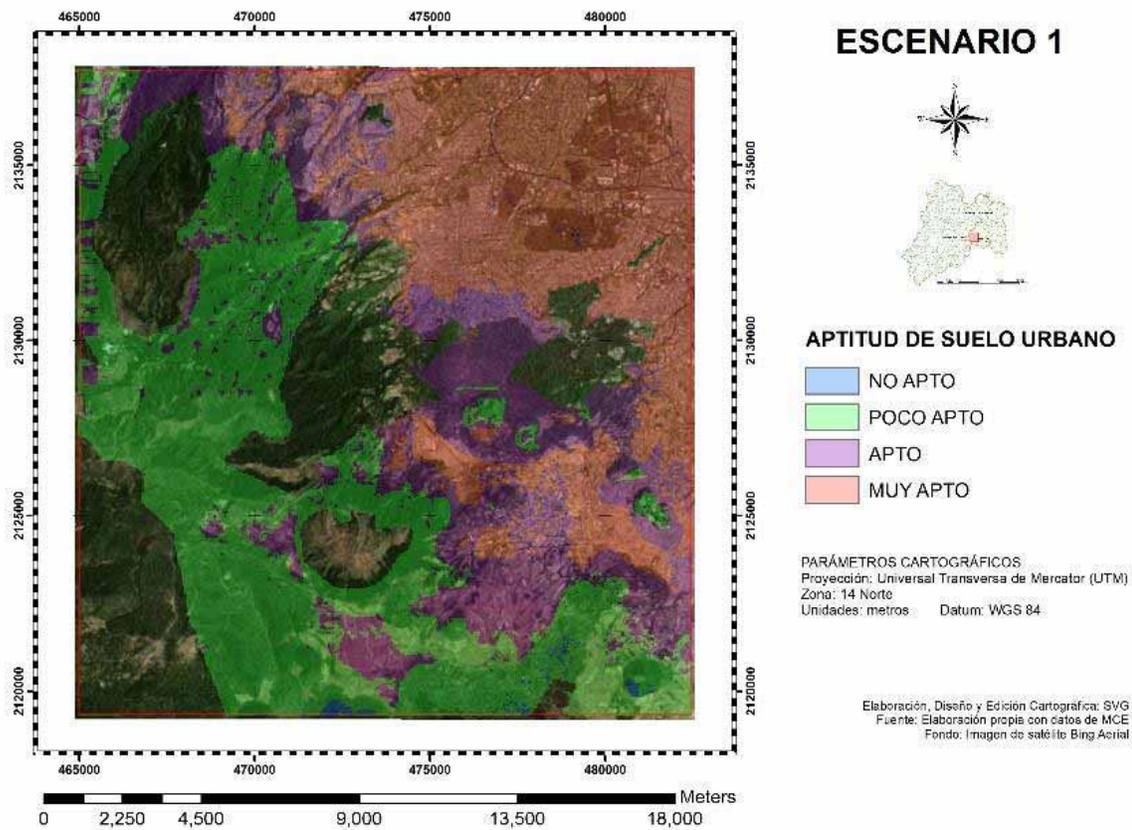


Figura 68. Escenario 1 de la aptitud de suelo urbano.

De acuerdo a la MCE, las zonas con mejor aptitud para uso urbano se encuentran en el noreste de la zona, cercano a la superficie donde ya hay núcleos urbanos y corresponde al uso de suelo urbano y agricultura (figura 68).

Escenario 2

Se elaboró utilizando como factores la altitud, la distancia a zonas urbanas, vialidades y corrientes, así como el tipo de rocas, las cuales fueron las cinco variables con mayor correlación (ROC) en base a la RL (tabla 14). Como limitante se usaron los polígonos de las áreas naturales protegidas y los cuerpos de agua.

La ponderación de las variables quedó de la siguiente manera:

Tabla 14. Peso de las variables consideradas para escenario 2.

Variable	Peso
Altitud	0.2997
Tipo de roca	0.1707
Distancia a corrientes	0.0861
Distancia a calles	0.1168
Distancia a asentamientos humanos	0.3266

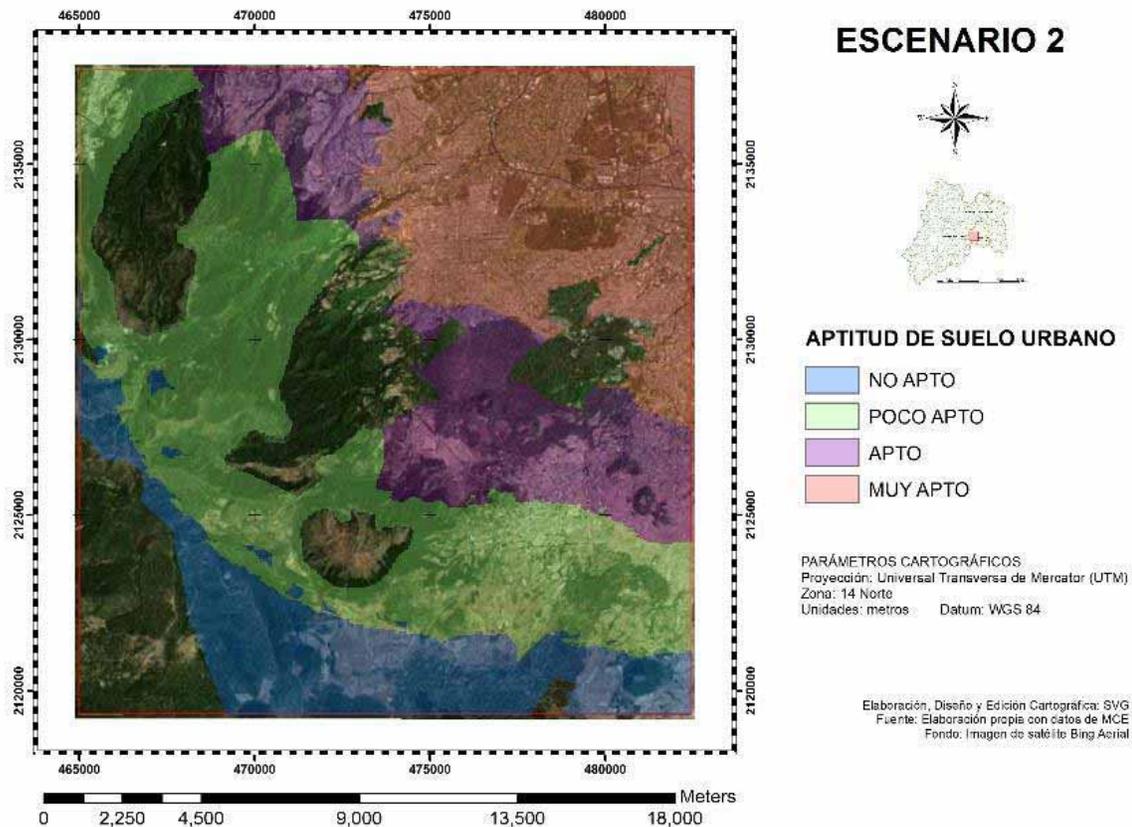


Figura 69. Escenario 2 de la aptitud de suelo urbano.

Este escenario tiene una delimitación más continua entre lo más apto y lo menos apto, dejando a superficie ya urbanizada dentro de la mejor aptitud (figura 69).

Escenario 3

Los polígonos de las áreas naturales protegidas, las zonas inundables, el área de recarga y los cuerpos de agua se usaron como zona limitantes para el crecimiento urbano. En este caso se usaron como factores la pendiente, la cobertura de suelo, la distancia a zonas urbanas y vialidades, que son las cuatro variables que determinaron como criterios para ocupación urbana en el PGOEDF (tabla 15).

La ponderación de las variables quedó de la siguiente manera:

Tabla 15. Peso de las variables consideradas para escenario 3.

Variable	Peso
Pendiente	0.038
Cobertura de suelo	0.3829
Distancia a calles	0.2739
Distancia a asentamientos humanos	0.3046

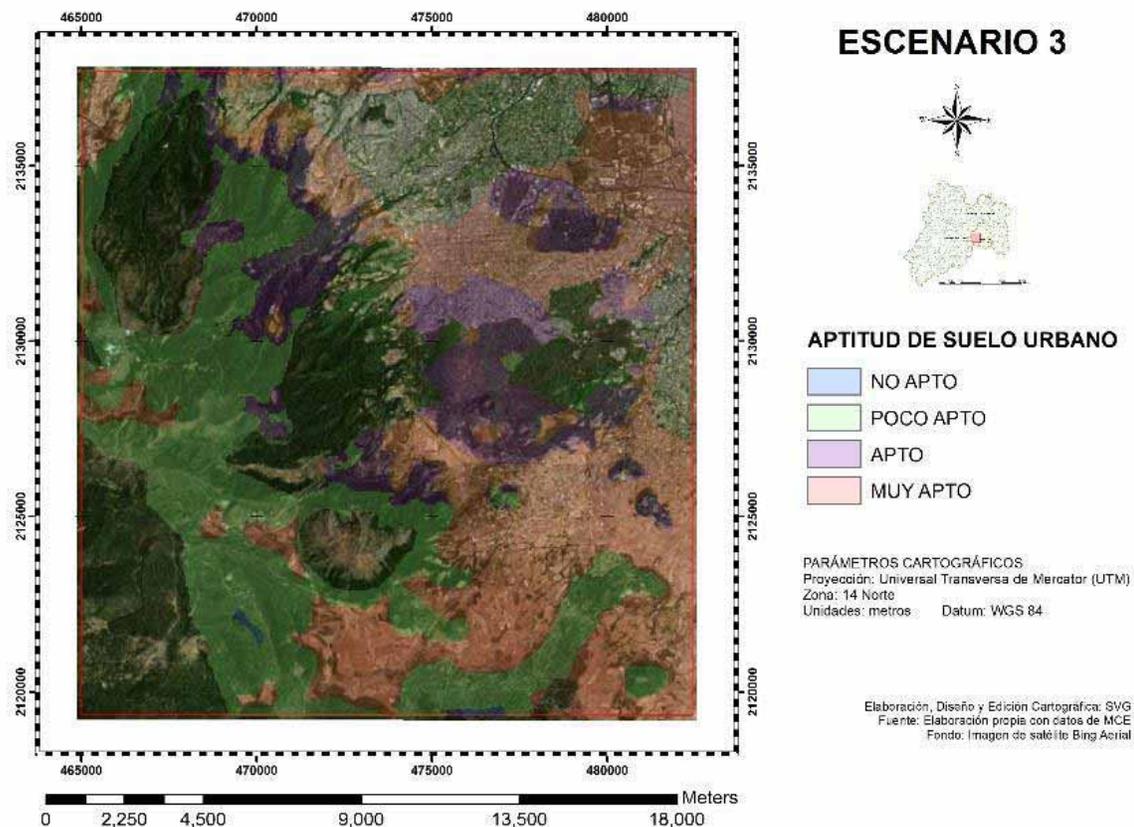


Figura 70. Escenario 3 de la aptitud de suelo urbano.

Este escenario tiene una mayor dispersión en la aptitud del suelo, dando aptitud alta de urbanización en algunos polígonos donde de acuerdo a la serie V, están cubiertos por bosque de pino, encino, pastizales o con uso agrícola (figura 70).

Escenario 4

Para la construcción de este escenario se eligieron como factores la pendiente, la cobertura de suelo, la distancia a zonas urbanas, vialidades, corrientes, la altitud las cuales fueron ponderadas y elegidas de la misma forma de acuerdo al índice de correlación obtenido previamente en la RL, pero eliminando el tipo de rocas (tabla 16). Además se excluyeron los polígonos de las áreas naturales protegidas y los cuerpos de agua.

La ponderación de las variables quedó de la siguiente manera:

Tabla 16. Peso de las variables consideradas para escenario 4.

Variable	Peso
Cobertura de suelo	0.0572
Pendiente	0.0615
Altitud	0.2239
Distancia a corrientes	0.1537
Distancia a calles	0.2328
Distancia a asentamientos humanos	0.2708

Este modelo igualmente delimita de manera continua las zonas más aptas para urbanizarse que coinciden con lo ya urbanizado y la aptitud va disminuyendo de noreste a suroeste (figura 71).

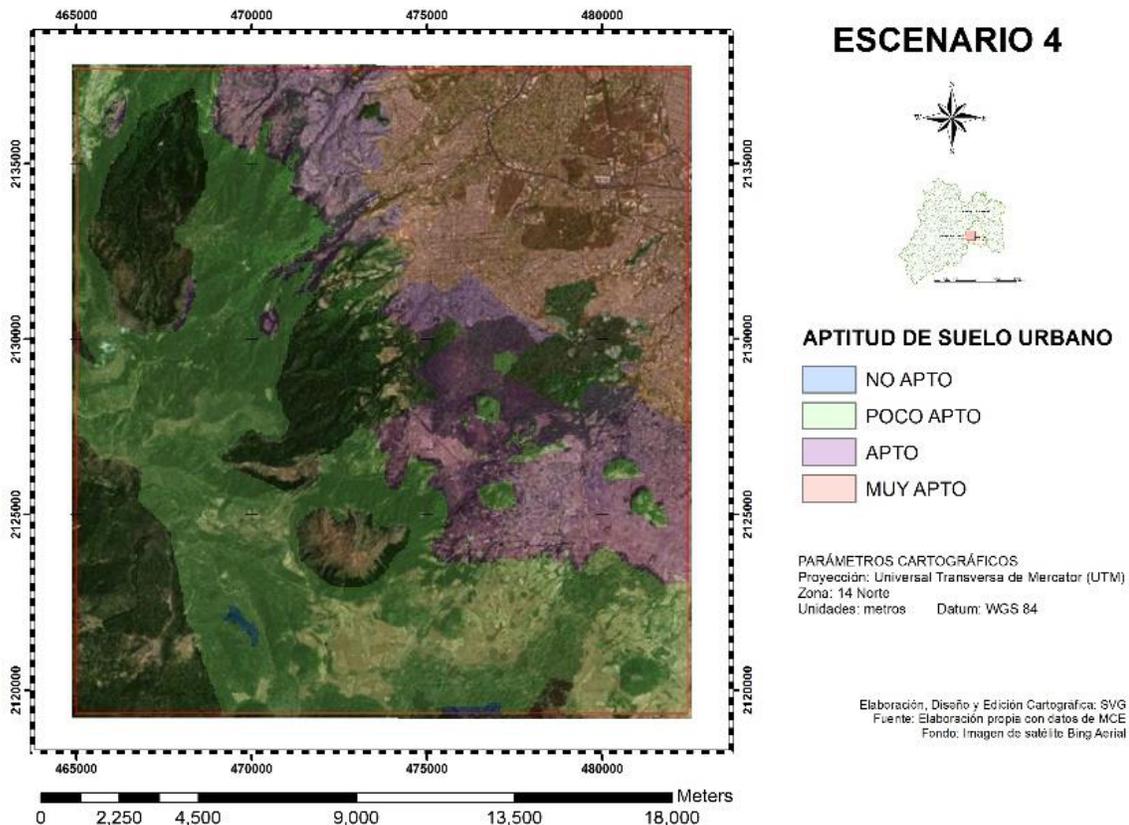


Figura 71. Escenario 4 de la aptitud de suelo urbano.

En este caso no se pretendió comparar los escenarios entre sí, puesto que cada uno se construyó de manera diferente dando prioridad a ciertos criterios de acuerdo a las referencias.

Sin embargo, si se intentó realizar una comparación con el Programa de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF) el cuál fue construido por la misma metodología en combinación con otras (modelos de decisión multicriterio, modelos de decisión multiobjetivo y SIG).

Este programa utilizó los siguientes criterios para definir la aptitud de uso de suelo urbano.

Tabla 17. Variables del PGOEDF.

Variable	Criterio
Pendiente	1° a 16°
Distancia a caminos	≤ 100 m
Distancia a poblados	≤ 200 m
Inundabilidad	Zonas no inundables
Restricciones	Sin restricciones

El (PGOEDF) considera 23,700 ha como suelo de conservación dentro de la zona de estudio, que equivale casi a tres cuartas partes. Esta superficie fue a su vez zonificada en unidades ambientales, de acuerdo a la capacidad del suelo y en respuesta a los conflictos ambientales generados por actividades humanas incompatibles (tabla 18).

De esta manera, en la zona se ubicaron las siguientes unidades ambientales con su superficie:

Tabla 18. Unidades ambientales del PGOEDF.

Unidad ambiental	Superficie (ha)
Agroecológico	808.91
Agroforestal	988.60
Agroforestal especial	2,544.79
Equipamiento rural	58.04
Forestal de conservación	8,610.30
Forestal de conservación especial	2,322.31
Forestal de protección	1,012.97
Forestal de protección especial	258.63
Poblados rurales	1,677.01
Programas parciales	203.99
Zona urbana	222.50
Áreas naturales protegidas	4,987.17

Como puede observarse en la tabla 18 dentro de esta denominación de suelo de conservación se consideran poco más de 17,000 ha con alguna categoría de protección o conservación, además, si se considera la superficie del Parque Estatal Otomí Mexica que tiene una superficie

de 2,197 ha dentro del área, son casi 20,000 hectáreas, lo equivalente a poco más del 60% del total de la superficie estudiada que tiene una aptitud de protección.

Este programa en base al análisis multicriterio y multiobjetivo, determinó cuatro grandes grupos para la aptitud de ocupación del suelo. El grupo orientado a la ocupación urbana fue el más pequeño y está caracterizado por presentarse en elevaciones bajas (promedio 2,578 msnm), con pendientes moderadas (promedio 8°), temperatura media anual de 13°C y precipitación media anual de 859 mm. Se consideró que el material parental constituido por brechas y tobas volcánicas es el predominante. Los suelos feozems háplicos y andosoles húmicos, como la cobertura de cultivo y pastizales fueron los más aptos para esta actividad. De acuerdo a esta información se construyeron algunos de los escenarios.

De acuerdo al Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (POEGT) la zona de estudio está considerada para hacer políticas referentes al aprovechamiento sustentable, protección, restauración y preservación.

Conforme a las variables consideradas para el escenario 2, esta podría ser una propuesta que coincide en cierta medida con el PGOEDF, es decir, asignando como zona apta para el crecimiento urbano aquellas zonas donde ya existe infraestructura o equipamiento urbano y en su caso en los poblados rurales que determina este programa. Por otro lado, se asigna la no aptitud urbana en las zonas de conservación y protección y no sólo en las ANP (figura 72).

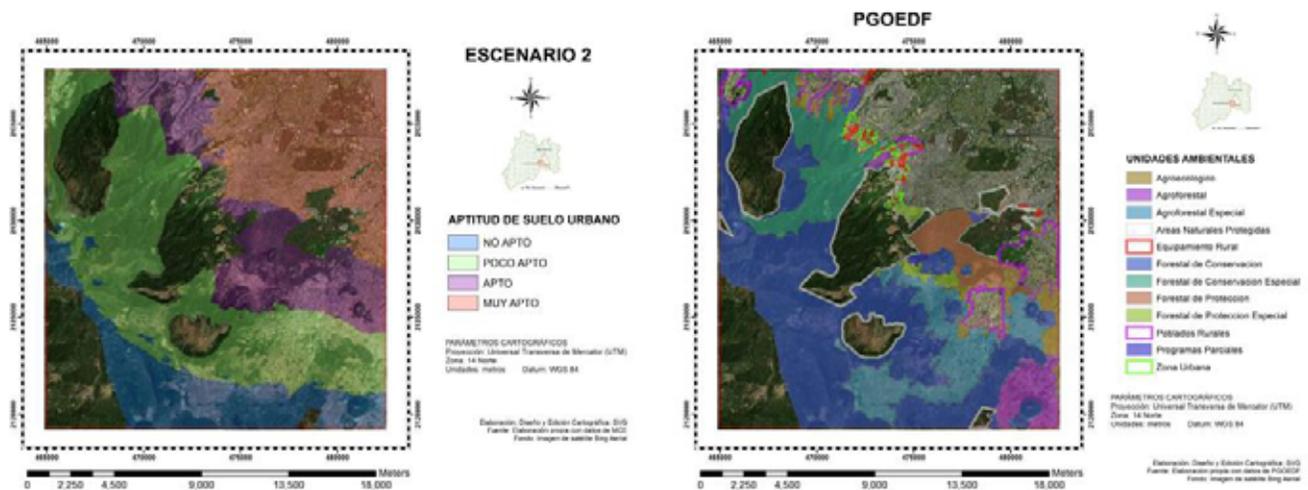


Figura 72. Comparación de escenarios (ver detalle en anexo 6).

El objetivo de realizar la MCE fue para conocer las superficies más aptas para ser urbanizadas, sin embargo, al momento de realizar políticas públicas para el ordenamiento territorial, hay que tener en cuenta varios objetivos y en ocasiones una misma superficie puede ser apta para uno o más de estos. Así, la delimitación de la zona urbana debe hacerse respetando las zonas que tengan una aptitud diferente.

Los escenarios aquí presentados son un primer acercamiento para clasificar las zonas más aptas para urbanizarse de acuerdo a los criterios considerados. Para la realización de política pública, es necesario contar con un grupo interdisciplinario para definir el problema, plantear los objetivos, buscar y evaluar alternativas y finalmente hacer un análisis de sensibilidad para validar el modelo obtenido (Gómez y Barredo, 2005).

Los Programas de Ordenamiento Territorial se hacen con base en esta y otras técnicas, y se supone deben respetar la zonificación establecida en los programas de mayor nivel jerárquico, empezando por el POEGT, en seguida los estatales o en su caso el del Distrito Federal y finalmente los municipales o delegacionales. Sin embargo, de acuerdo a la PAOT al comparar la aptitud de uso de suelo que marca el PGOEDF y los PDDU de las delegaciones políticas, contabilizaron un total de 400 polígonos con incompatibilidades de los usos de suelo asignado en ambos programas. Se puede ver que aunque ambos programas se hicieron usando MCE, los resultados obtenidos no siempre fueron los mismos, pues los objetivos planteados pueden ser distintos. El uso de esta técnica, no garantiza el cumplimiento de la normatividad ambiental de la zona, se debe tener mucho cuidado al realizar la evaluación de los usos de suelo para cumplir con los objetivos tendientes a la protección ambiental y el desarrollo económico de las grandes urbes.

Esta técnica también es útil para modelar escenarios de crecimiento urbano, teniendo en cuenta las limitaciones que pudiera tener el modelo, puesto que quizá no se tengan los datos geoespaciales de todas las variables que pudieran estar influyendo en el crecimiento (Rosa, 2010).

IV.2. Conclusiones

- La zona urbana creció cerca de tres veces en tres décadas, con un crecimiento de 323 ha por año.
- La zona urbana se estableció sobre 2,971 ha que estaban clasificadas como bosques o uso agrícola o de pastizal.
- Los polígonos que tenían un uso de suelo para agricultura de temporal (1301 ha) o que eran usados como pastizales (322 ha), perdieron una mayor superficie que fue utilizada como uso urbano.
- El bosque de encino fue el tipo de vegetación que cedió mayor superficie al suelo urbano (1,042 ha).
- En la zona de los Dinamos, el Desierto de los Leones y el Pico del Águila, se observaron árboles adultos en buen estado y hay presencia de plántulas de pino y oyamel. Se vieron diversos estratos en estos bosques y una diversidad de herbáceas, gramíneas, líquenes, helechos, hongos, epífitas y otras especies. Por lo que podría decirse que estos ecosistemas están en buen estado.
- De acuerdo al escenario 1 construido con la ecuación de regresión logística, las zonas con mayor probabilidad de crecimiento se ubican en la parte noreste del área de estudio, en las delegaciones Tlalpan, Coyoacán Álvaro Obregón y Magdalena Contreras.
- Las variables orientación, altitud, pendiente, distancia a corrientes y cuerpos de agua, distancia a la red vial a zona urbana, tipo de suelo, cobertura de suelo y tipo de roca (sólo en escenario 1) son las que tienen mayor influencia en el crecimiento urbano.
- El escenario 2 construido en base a las cadenas de Markov, se validó con un ajuste muy alto (índice Kappa 0.98) con respecto a la zona urbana de la serie V.
- El escenario 2 construido en base a las áreas de transición generadas con Markov y las variables explicativas se ajustaron muy bien a la superficie delimitada como zona urbana de la serie V (índice Kappa 0.97).
- Los escenarios construidos en base a la teoría de cadenas de Markov y autómatas celulares no pronosticaron algún cambio en el crecimiento de la zona urbana, sin embargo, se debe tener en cuenta que hay más variables que pudieran influir en el crecimiento.
- Las variables consideradas en este trabajo pueden influir en el crecimiento urbano, de forma positiva o negativa.
- Matemáticamente hablando, los modelos tienen un buen poder predictivo con base en las teorías empleadas para cada método. Pero además hay que considerar que la dinámica del crecimiento urbano tiene muchas otras variables que no siempre se pueden incluir en los modelos o que inclusive se desconocen.
- De acuerdo a la MCE el escenario 2 las zonas más aptas para el establecimiento de zona urbana son aquellas que tienen menor altitud (2,200 y 2,800 msnm), están sobre

roca volcanoclástica, se encuentran más cercanas a infraestructura vial por lo menos a 100 m, a asentamientos humanos (200 m) y estén a por lo menos 10 m a cada lado de las corrientes de agua (figura 68).

- La aptitud de suelo urbano propuesta en el escenario, coincide en cierta medida con la superficie asignada como zonas donde existe equipamiento urbano y poblados rurales, según el PGOEDF. Sin embargo, no se pueden hacer comparaciones específicas por que el PGOEDF tiene entre otros objetivos, la clasificación de las distintas zonas para ser urbanizadas, con alguna actividad productiva o de protección.
- Se logró la identificación de los cambios de uso de suelo y vegetación que se han dado en la zona entre la serie I y V, lo cual es importante para establecer medidas tendientes a evitar la pérdida de ciertas coberturas de vegetación y evitar el establecimiento de infraestructura urbana en sitios con otra aptitud de suelo.

IV.3. Recomendaciones

- Aunque existen varios parques nacionales que en teoría fueron diseñados para la protección de ciertos ecosistemas vulnerables o importantes, es necesario que cuenten con planes de manejo adecuados y con personal que garantice su protección.
- Asimismo, las superficies agrícolas tienen que ser utilizadas de manera que se evite el deterioro de los ecosistemas aledaños y se pierda su productividad. Es necesario contar con los estudios pertinentes que justifiquen el cambio de uso de suelo de estas áreas para ser urbanas. Además de garantizar el correcto manejo de dichas áreas dotándolas de los servicios necesarios para su establecimiento y con ello evitar la perturbación del ambiente.
- Es necesario tener especial cuidado en la comunidad de encinos, hay que identificar exactamente por qué están siendo eliminados o como se está modificando la estructura de su comunidad, que está conllevando a su pérdida.
- Las zonas boscosas proveen de áreas de esparcimiento y recreación para todos los habitantes, sin embargo hay que tener cuidado con el tipo de turismo que se realiza en ellas, para evitar su degradación.
- Es necesario incorporar variables socio económicas a este tipo de estudios, trabajando con un grupo interdisciplinario para obtener resultados que tengan bases teóricas adecuadas.
- El crecimiento urbano pareciera ser algo inevitable dentro de la zona, sin embargo, es importante regularlo y planificarlo de manera sostenible.
- El que existan o no programas de ordenamiento territorial no garantiza el uso y aprovechamiento del suelo de manera sostenible, no obstante son una buena herramienta que tiene que usarse en la realidad y no sólo en papel.

- Sería bueno realizar el mismo análisis geoespacial de la zona con imágenes satélite de alta resolución o con fotografías aéreas a buena escala.
- Todos los habitantes de la Ciudad de México y zonas aledañas se ven beneficiados con los servicios ambientales que proveen las zonas provistas de vegetación por lo cual si degradamos, nos veremos afectados en nuestra calidad de vida de manera directa o indirecta.
- Los modelos utilizados en este trabajo son un primer acercamiento a conocer como se pudieran comportar los sistemas dentro de un algoritmo matemático y con ello visualizar algunos escenarios a futuro basados en esas técnicas.
- Los modelos son una buena herramienta para pronosticar el crecimiento urbano, sin embargo, hay que usarlos con cautela.
- Aún como visitantes extemporáneos a estas zonas es importante respetar, cuidar y proteger el ecosistema que estamos disfrutando.

REFERENCIAS

Artículos

- Aguilar, G. (2002). Las megaciudades y las periferia expandidas. Ampliando el concepto en Ciudad de México. *EURE (Santiago)*, 28(85), en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612002008500007&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Aguilera B. F. (2006): Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*, (6), 81-112.
- Akın, A., Sunar, F., y Berberoğlu, S. (2015). Urban change analysis and future growth of Istanbul. *Environmental monitoring and assessment*, 187(8), 1-15.
- Akanbi, A., Kumar, S. y Fidelis, U. (2013). Application of remote sensing, GIS and GPS for efficient urban management plan – A case study of part of Hyderabad city. *Novus International Journal of Engineering & Technology*, 2(4), 1-14.
- Amuzurrutia-Valenzuela, D.; Aguirre-Salado, C. y Sánchez-Díaz G. (2015). ¿Hacia dónde crece la Ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009?. *EURE*, 41(124), 113-137.
- Arsanjani, J. J., Helbich, M., Kainz, W., y Bolorani, A. D. (2013). Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265-275.
- Batisani, N. y Yarnal, B. (2009). Urban expansion in Centre County, Pennsylvania: Spatial dynamics and landscape transformations. *Applied Geography*, 29, 235-249.
- Aguayo, M. (2007). Como hacer una Regresión Logística con SPSS paso a paso. *Fundación Andaluza Beturia para la investigación en salud*. Dot. Núm. 0702012, 1-16.
- Camacho Olmedo, M. T., Paegelow, M., y García A. D. (2015). Mapas de potencial de transición versus mapas de aptitud para modelar el cambio de usos y coberturas del suelo. *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*: 541-550.
- Chuvieco E. Simulación Prospectiva de Cambios de uso de suelo. 2014. Universidad de Alcalá.
- Cerda, J., y Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 54-58.
- Da Silva, C. J., y Cardozo, O. D. (2015). Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina). *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 16: 23-40. ISSN: 1578-5157
- De la Fuente F. S. (2011). Regresión Logística. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Autónoma de Madrid.

- De Koning, G. H., Verburg, P. H., Veldkamp, A., y Fresco, L. O. (1999). Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems* 61(2), 77-93
- Escobedo, M. F. (1992). El crecimiento urbano en la ciudad de México y su impacto ambiental. *Revista de Administración Pública*. Gobierno y Administración Metropolitana 83: 133-141. Disponible en: <http://www.juridicas.unam.mx/publica/librev/rev/rap/cont/83/pr/pr16.pdf>
- Gómez Delgado, M., Aguilera Benavente, F., Barreira González, P., Bosque Sendra, J., y Rodríguez Espinosa, V. M. (2014). Simulación prospectiva del crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid a partir de modelos basados en autómatas celulares y modelos basados en EMC. Publicado en las memorias del XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.
- Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., y Hokao, K. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20), 3761–3772.
- Henríquez, C., Azócar, G., y Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 61-74.
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30, 945–964
- Henríquez, C., y Qüense, J. (2010). Evaluación Multiobjetivo aplicada a los usos/coberturas de suelo en la cuenca de Chillán. *Tiempo y Espacio*, 25, 21-39.
- Instituto de Geografía (IG) UNAM, e INE. (2006). Urbanización periférica y deterioro ambiental en la ciudad de México: el caso de la Delegación Tlalpan en el Distrito Federal. http://www.inecc.gob.mx/descargas/ord_ecol/proy_urba_tlalpan.pdf, consultado el 15 de Febrero de 2016, México D.F.
- Llaugel, F. A., y Fernández, A. I. (2011). Evaluación del uso de modelos de regresión logística para el diagnóstico de instituciones financieras. *Ciencia y Sociedad*, XXXVI(4), 590-627.
- López E., Bocco, G., Mendoza, M., y Duhau, E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, Mexico. *Landscape and Urban Planning*. 55(4), 271–285.
- López. V. V. y Plata R. W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. (68), 85-101.
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L., y Asensio Rodríguez, J. J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio, *GeoFocus* (7), 120- 147. ISSN: 1578-5157

- Muller, M. R., y Middleton, J. (1994). A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 9(2), 151-157.
- Quintana, M. J. M., Gallego, A. G., y Pascual, M. E. V. (2011). Aplicación del Análisis Discriminate y Regresión Logística en el estudio de la morosidad en las Entidades Financieras Comparación de Resultados. *Pecunia*, 1(), 175 – 199.
- Shafizadeh Moghadam, H., y Helbich, M. (2013). Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140-149.
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., y Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*, (3), 22-44.
- Pineda J. N., Bosque S. J., Gómez D. M. y Plata R. W. (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.
- Ramírez, J. I. (2008). Distribución de la población y crecimiento urbano en México. *Análisis Económico*, XXIII(52), 201-218.
- Rosa, V. P., Benavente, F. A., Delgado, M. G., y Sendra, J. B. (2011). Crecimiento urbano deseable para la aglomeración urbana de Granada en 2020. En *Actas de I Congreso Internacional en Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica* [Recurso electrónico]: Ciudad de Tegucigalpa, Honduras, del 11 al 16 de octubre de 2010 (pp. 578-596). Servicio de Publicaciones.
- Velázquez, A.; Mas, J. F.; Díaz Gallegos, J. R.; Mayorga-Saucedo, R.; Alcántara, P. C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E.; y Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21-37.
- Weng, Q. (2001). Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. *Environmental Management*, 28(6), 737–748.
- White, R y Engelen G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems, *Computers, environment and urban systems*, 24(5), 383-400.
- Wolfram, S. (1984): Cellular automata as model of complexity. *Nature*, 311(5985), 419-424

Libros y Publicaciones

- Benítez G., Chacalo A. y Barois I. (1987). Evaluación comparativa de la pérdida de la cubierta vegetal y cambios en el uso del suelo en el sur de la Ciudad de México. *Aportes a la Ecología Urbana de la Ciudad de México*. Limusa. México.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2000). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2000. *Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2005). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005. *Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2010). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010. *Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México
- Eastman, J. (2012). IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. *Clark Labs, Clark University*: 321 p.
- Eastman, J. (2003). IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, MA: *Clark Labs, Clark University*: 328 p.
- Garza G. (2005), La urbanización de México en el siglo XX, México, El Colegio de México.
- Garza G. (2010). La transformación urbana en México, 1970 – 2020 en *Desarrollo Urbano y Regional*. 1ª Edición. *Colegio de México*. México. D.F.
- Gómez, D. M., y Barredo C. J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación de Territorio. Editorial *RA-MA*. 2º Edición. España. 277 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1998). Diccionario de Datos Edafológicos escala 1:250 000 (vectorial). INEGI. México
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2002. Conjunto de datos vectoriales E1402 de la carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000 Serie II (Ciudad de Mexico).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004. Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Guía para la Interpretación de la Cartografía Uso del Suelo y Vegetación version I. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2006. Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional). México.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000 Serie IV (Conjunto Nacional). México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2013 (a). Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000 Serie V (Conjunto Nacional). México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2013 (b). Diccionario de Datos del Continuo Nacional Geológico INEGI-SGM Escala 1:250 000. México.
- OCDE. 2015. Síntesis del estudio titulado “OECD Territorial Reviews: Valle de México, México”. Biblioteca Virtual de la OCDE. www.oecd.org/gov/cities
- Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT). 2009. Estudio sobre la superficie ocupada en áreas naturales protegidas del Distrito Federal. Disponible en www.paot.org.mx
- Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT). 2010. Estudio sobre la zona de transición entre suelo urbano y suelo de conservación en el Distrito Federal. Disponible en www.paot.org.mx
- Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT). 2015. Agenda 2015.
- SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2012). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010.
- SEMARNAP y RDS (Red para el Desarrollo Sostenible A. C). (2000) Áreas Naturales Protegidas de México con Decretos Federales. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/130.pdf>, consultado el 1 de febrero de 2016, México D.F.
- Sánchez Salazar, M. T., Verdinelli, G. B., e Izquierdo, J. C. (2013). La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica. *Instituto de Geografía, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)*. México, 1ª edición. 19-44 pp., ISBN 978-607-02-4848-1
- Siebe, C. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670+/-35 años AP y sus implicaciones. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF, 43-49.
- Ortega-Álvarez, R., MacGregor-Fors, I., Pineda-López, R., Ramírez-Bastida, P., y Zuria I. (2013). Ecología Urbana. Experiencias en América Latina. MacGregor-Fors, I. y Ortega-Álvarez R. (eds). Disponible en línea: www1.inecol.edu.mx/libro_ecologia_urbana

Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. London, Pion.

Leyes, normas y programas

Acuerdo. No. 1689 Tomo II. Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2013-2018. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicado el 11 de septiembre de 2013.

Código Administrativo del Estado de México (CAEM). Gaceta del Gobierno. México. Publicado el 13 de Diciembre de 2001, última reforma el 17 de febrero de 2015.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2001. Derechos de Vía. NRF-014-CFE.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 5 de febrero de 1917, última reforma del 27 de enero de 2016. En <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/htm/1.htm>

Decreto número 72. Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México. Gaceta del Gobierno. México. Publicado el 17 de noviembre de 1917, última reforma el 14 de diciembre de 2015.

Decreto número 2. Ley Orgánica de la Administración Pública del Estado de México. Gaceta del Gobierno. México. Publicado el 17 de diciembre de 1981, última reforma 6 de agosto de 2003.

Decreto. No. 139. Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF). Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicado el 1 de agosto de 2000.

Decreto. Programa general de desarrollo urbano del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicado el 31 de diciembre 2003.

Decreto. No. 904 Tomo II. Programa delegacional de desarrollo urbano para la delegación Tlalpan del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicado el 11 de agosto de 2010

Decreto. Tomo CXXIX. Número 4. Se crea el Parque Ecológico Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa, que se denominará Parque Otomí Mexica. Gaceta de Gobierno. México. Publicado el 8 de enero de 1980.

Ley general de asentamientos humanos. Diario Oficial de la Federación Estados Unidos Mexicanos. México. Publicada el 26 de mayo de 1976. Posteriormente se publicó una nueva ley el 21 julio 1993 última reforma 24 enero 2014.

Ley de desarrollo urbano del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 15 de julio de 2010, última reforma el 24 de marzo de 2015.

- Ley de desarrollo metropolitano para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 3 de enero de 2008, última reforma el 8 de octubre de 2014.
- Ley orgánica de la procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 24 de abril de 2001, última reforma 18 de diciembre de 2014.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Diario Oficial de la Federación. México. Publicado el 28 de enero de 1988, última reforma el 9 de enero de 2015.
- Ley para la retribución por la protección de los servicios ambientales del suelo de conservación del Distrito Federal (LRPSASCDF). Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 4 de octubre de 2006
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS). Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 7 de diciembre de 2001, última reforma el 12 de enero de 2012.
- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 7 de junio de 2013.
- Ley Ambiental del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 13 de enero 2000.
- Ley Orgánica de la Administración Pública Del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 29 de diciembre de 1998.
- Ley ambiental de protección a la tierra en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 13 de enero del 200, última reforma 20 de agosto de 2015.
- Ley que crea el organismo público descentralizado de carácter estatal denominado Instituto Mexiquense de la Vivienda Social. Gaceta del Gobierno. México. Publicado el 23 de septiembre de 2003, última reforma 14 de mayo de 2014.
- Ley de asentamientos humanos del Estado de México. Gaceta del Gobierno. México. Publicado el 1 de marzo de 1993.
- Plan rector de las áreas naturales protegidas del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 9 de junio de 2010.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 8 de agosto de 2003, última reforma el 31 de octubre de 2014.
- Reglamento del Consejo para el desarrollo urbano sustentable del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 7 de octubre de 2014, última reforma el 30 de septiembre de 2015.

Reglamento de la Ley de desarrollo urbano del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 29 de enero de 2004, última reforma el 29 de enero de 2014.

Reglamento para el ordenamiento del paisaje urbano del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. Publicada el 29 de agosto de 2005, última reforma el 15 de agosto de 2011.

Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio. (POEGT). 2012, disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamiento-ecologico/programa-de-ordenamiento-ecologico-general-del-territorio-poegt>

Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle De México (POZMVM). 1998. Comisión Metropolitana de Asentamientos Humanos (COMETAH). México 196 p.

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (POETEM).

Tesis

García E. E. (2008). El Proceso de Expansión Urbana y su Impacto en el Uso de Suelo y Vegetación del Municipio de Juárez, Chihuahua. Tesis de Maestra en Administración Integral del Ambiente. El Colegio de la Frontera Norte. Tijuana, B. C., México.

García A. V. (2012). Análisis de aptitud del suelo de la Subcuenca San Pedro Bajo Mezquital. Tesis de Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental. Instituto Politécnico Nacional. Durango, Dgo., México.

Gómez A. A. (2009). Estudio multitemporal de la dinámica de transformación espacial de la cobertura por crecimiento urbano, en una zona de la localidad de Suba, Bogotá –Colombia, en el periodo 1955 – 2006. Tesis de Ecóloga. Pontificia Universidad de Javeriana. Bogotá, Colombia.

Hernández R. C. (2015). Dinámica del crecimiento urbano de la zona metropolitana Zacatecas – Guadalupe: cambio de uso de suelo y simulación de escenarios futuros. Tesis de Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental. Instituto Politécnico Nacional. Durango, Dgo., México.

Plata R. W. (2010). Descripción, Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano Mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El Caso de la Comunidad de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares.

Sandoval V. G. (2009). Análisis del Proceso de Cambio de Uso y cobertura de Suelo en la Expansión Urbana del Gran Valparaíso, su Evolución y Escenarios Futuros. Tesis De Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Singh AK. (2003). Modelling land use land cover changes using celular automata in a geo-spatial environment. Master thesis. International Institute for geo-information science and earth observation enschede (ITC). The Netherlands.

Paginas consultadas

ONU y OMS. Áreas verdes por habitante en <http://www.miparque.cl/tag/oms/>

ONU. *Manual de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía Digital*. [En línea] Estudios de Métodos. Serie F No. 79. Nueva York 2000. (Inglés - Español). [Disponible en: http://unstats.un.org/unsd/publication/SeriesF/SeriesF_79S.pdf].

INEGI 2010. Censos de población y vivienda en <http://www.inegi.org.mx>

Glosario de INEGI en <http://cuentame.inegi.org.mx/glosario/c.aspx?tema=G>

UNICEF en <http://www.unicef.org/spanish/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-Definiciones.pdf>

Real Academia Española en <http://buscon.rae.es/drae/srv/search?val=urbanice>

Sociedad Española de Bioquímica Clínica y Patología Molecular (SEQC). Módulo 3:

Regresión Logística y Multiple en

http://www.seqc.es/es/Varios/7/40/Modulo_3:_Regresion_logistica_y_multiple/

SIMEC Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación en

<https://simec.conanp.gob.mx/>

INEGI 2010 en

http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/ageb_urb2010.aspx?c=28111

Parque ejidal San Nicolás Totolapan en <http://www.parque-ejidal-sannicolos.com/>

CEPANAF Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna en

<http://cepanaf.edomex.gob.mx/>

CONABIO, Biodiversidad Mexicana, consultada el 3 de febrero de 2016 en

http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/

Real academia española en <http://dle.rae.es/?id=PTk5Wk1>

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/Default.aspx>

www.paot.org.mx

<http://www.qgis.org/es/site/>.

<http://idrisi-kilimanjaro.software.informer.com/3.0/>

<http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/mapas.php>

http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/parques_nacionales.php

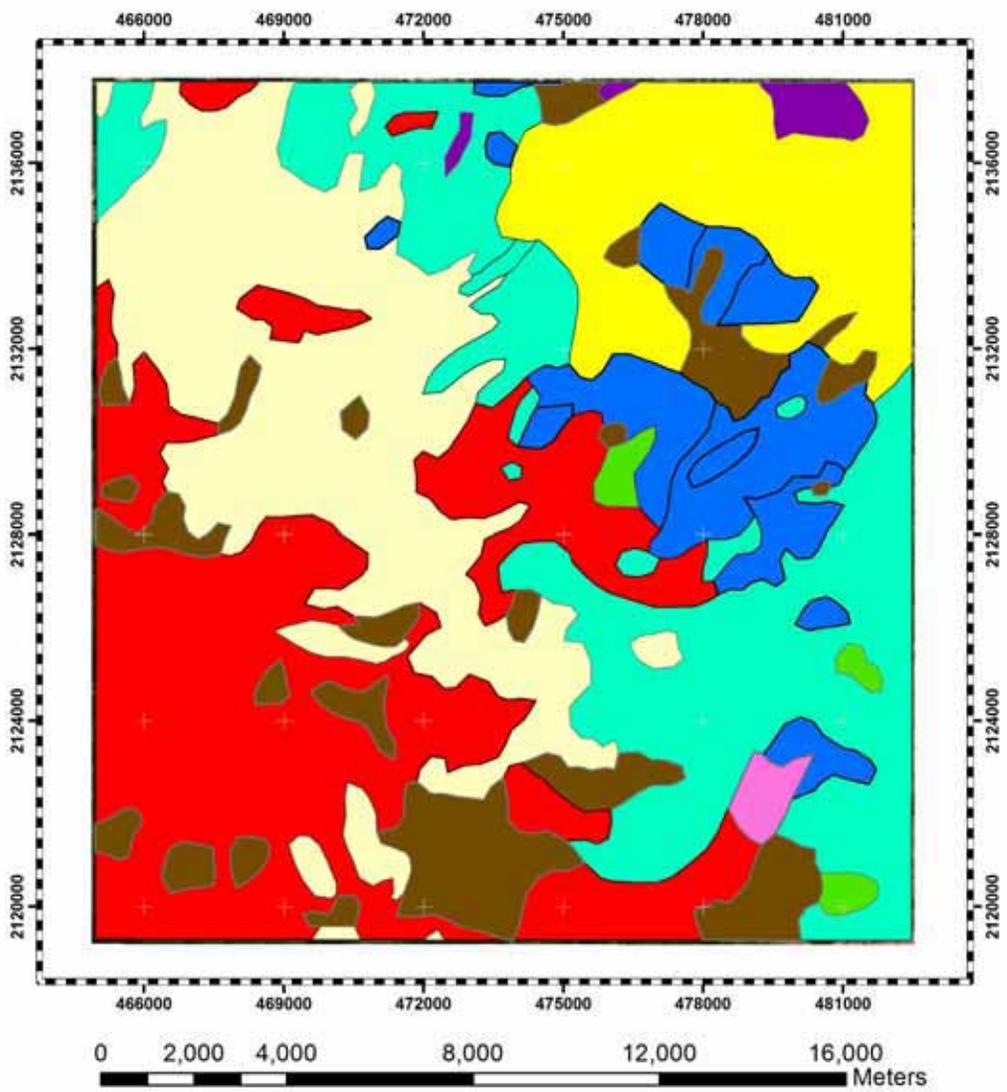
<http://www.anpsestatales.mx/anps.php>

http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

ANEXO 1

**Cartografía de uso de suelo y
vegetación de acuerdo a lo reportado
por INEGI de la SERIE I a la V**

Serie I



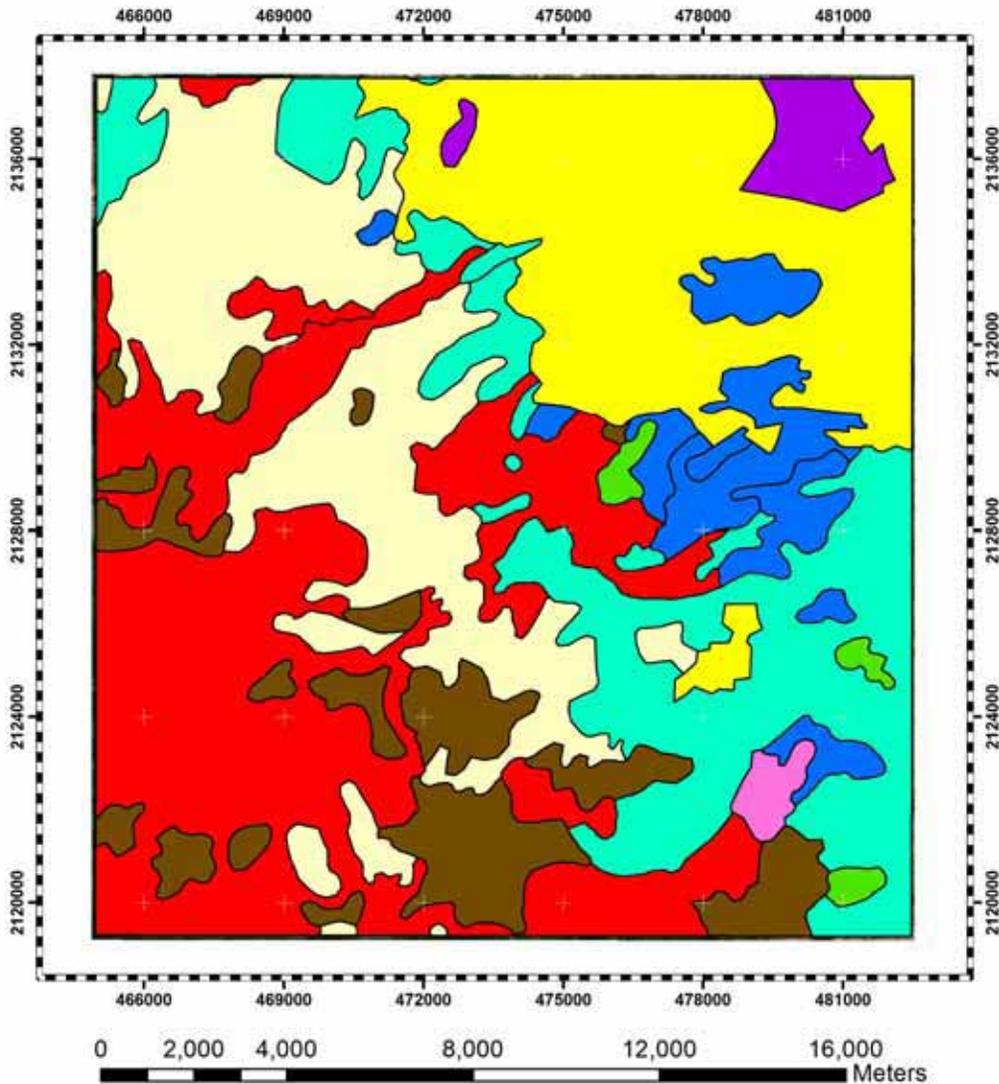
Uso de suelo y vegetación

- Bosque de encino
- Bosque de encino-pino
- Bosque de oyamel
- Bosque de pino
- Bosque de pino-encino
- Pastizal inducido
- Zona Urbana
- Agricultura de temporal
- Bosque cultivado

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imágen de satélite Bing Aerial

Serie II



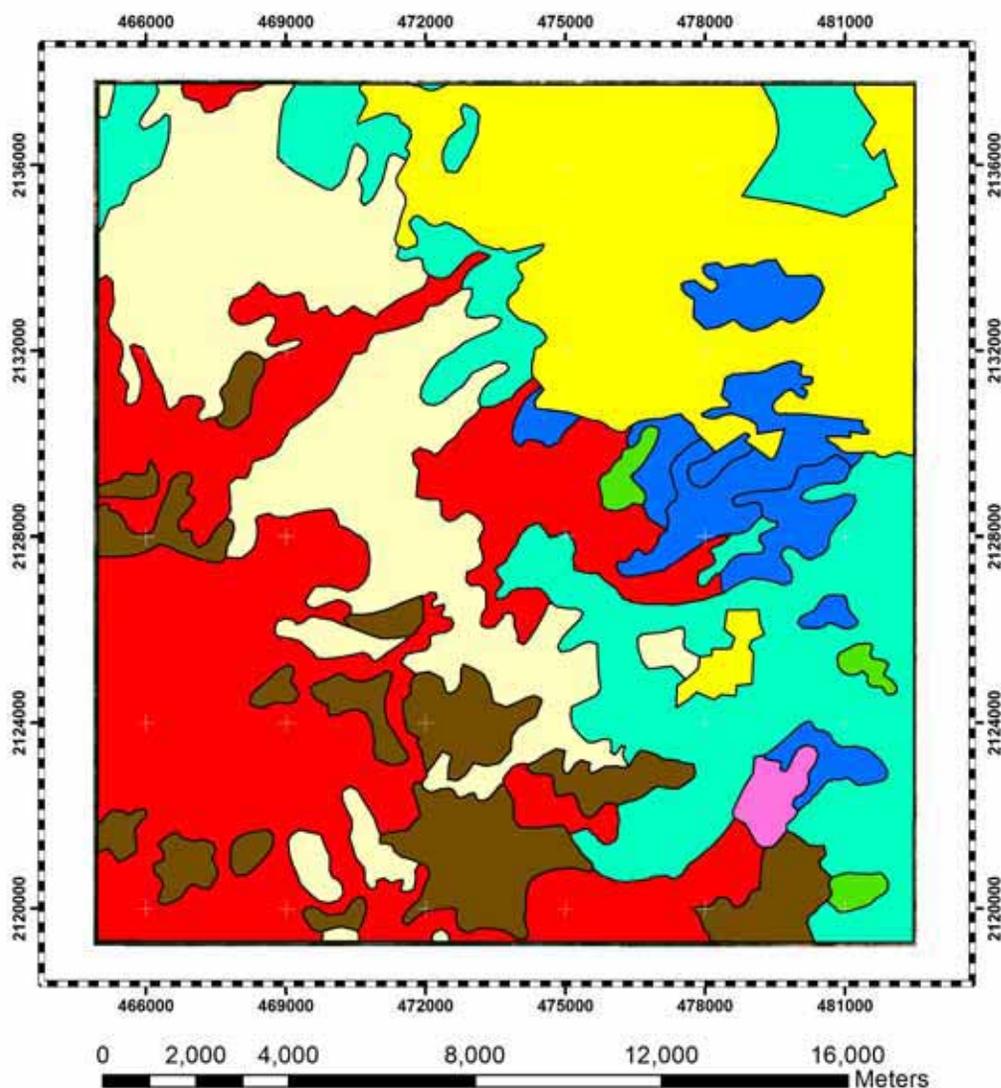
Uso de suelo y vegetación

-  Bosque de encino
-  Bosque de encino-pino
-  Bosque de oyamel
-  Bosque de pino
-  Bosque de pino-encino
-  Pastizal inducido
-  Agricultura de temporal
-  Zona Urbana
-  Bosque cultivado

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imágen de satélite Bing Aerial

Serie III



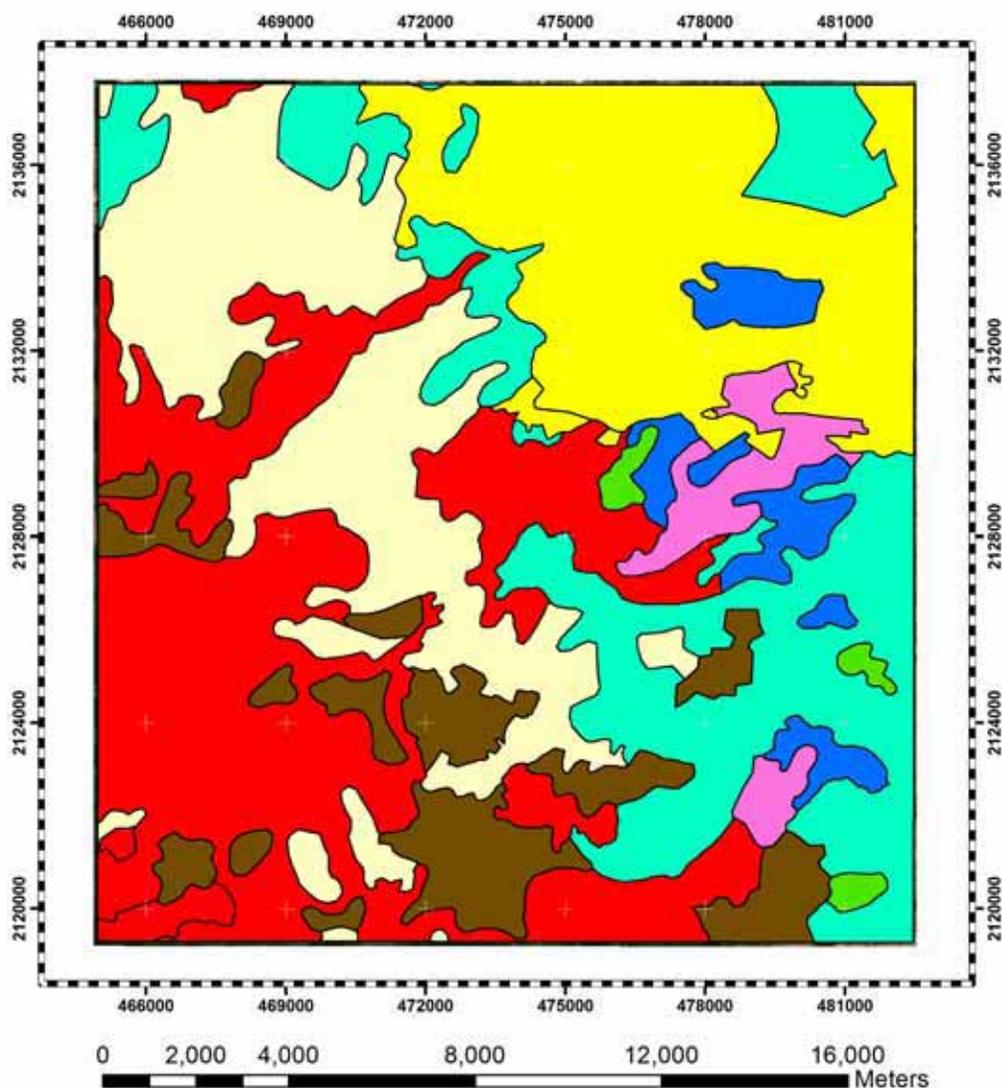
Uso de suelo y vegetación

- Bosque de encino
- Bosque de encino-pino
- Bosque de oyamel
- Bosque de pino
- Bosque de pino-encino
- Pastizal inducido
- Agricultura de temporal
- Zona Urbana

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imágen de satélite Bing Aerial

Serie IV



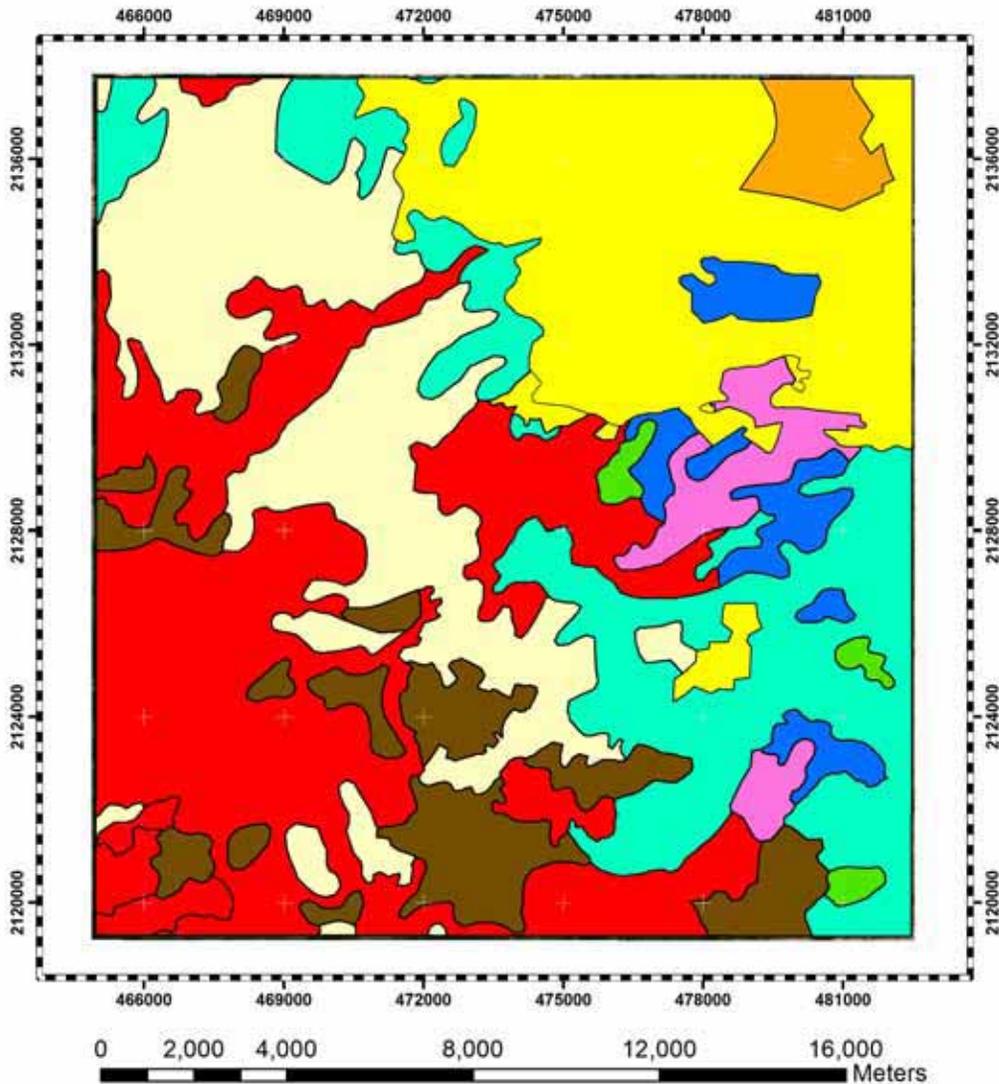
Uso de suelo y vegetación

- Bosque de encino
- Bosque de encino-pino
- Bosque de oyamel
- Bosque de pino
- Bosque de pino-encino
- Pastizal inducido
- Agricultura de temporal
- Zona Urbana

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imágen de satélite Bing Aerial

Serie V



Uso de suelo y vegetación

-  Bosque de encino
-  Bosque de encino-pino
-  Bosque de oyamel
-  Bosque de pino
-  Bosque de pino-encino
-  Matorral Crasicaule
-  Pastizal inducido
-  Agricultura de temporal
-  Zona Urbana

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imágen de satélite Bing Aerial

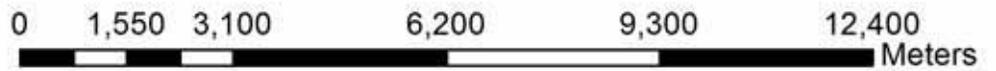
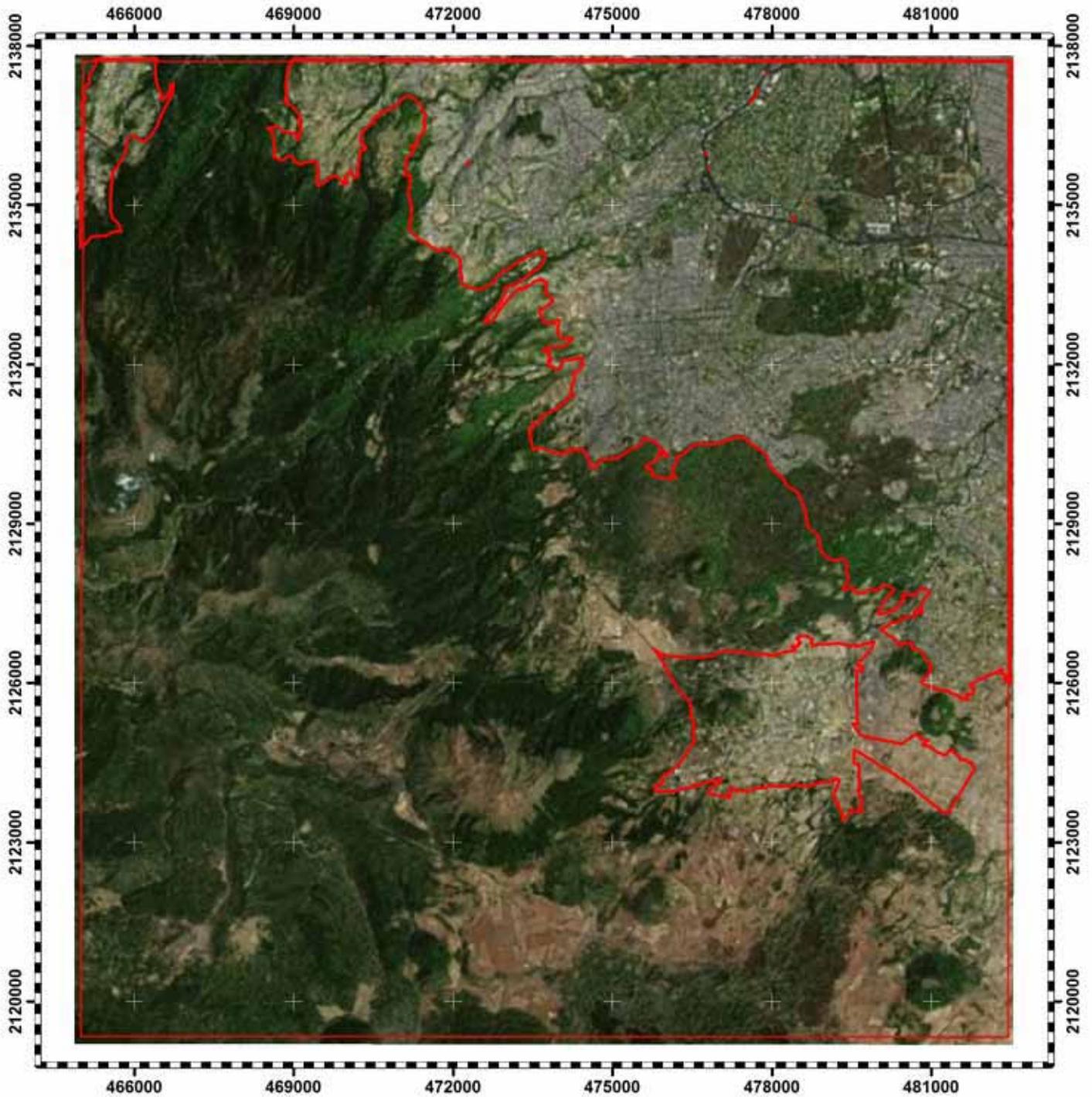
ANEXO 2

**Cartografía de la Zona Urbana de
acuerdo a las AGEB'S**

**Cartografía de la Zona Urbana de
acuerdo a la imagen de satélite
LANDSAT 8**

**Cartografía de la Zona Urbana de
acuerdo a lo reportado por INEGI en la
SERIE V**

AGEB'S URBANAS



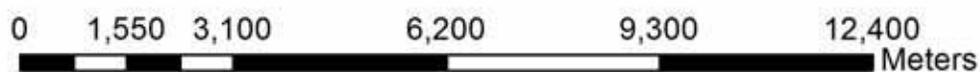
 Zona urbana Superficie: 10474 ha

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGSn84



Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

LANDSAT 8 2014



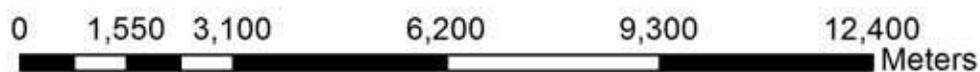
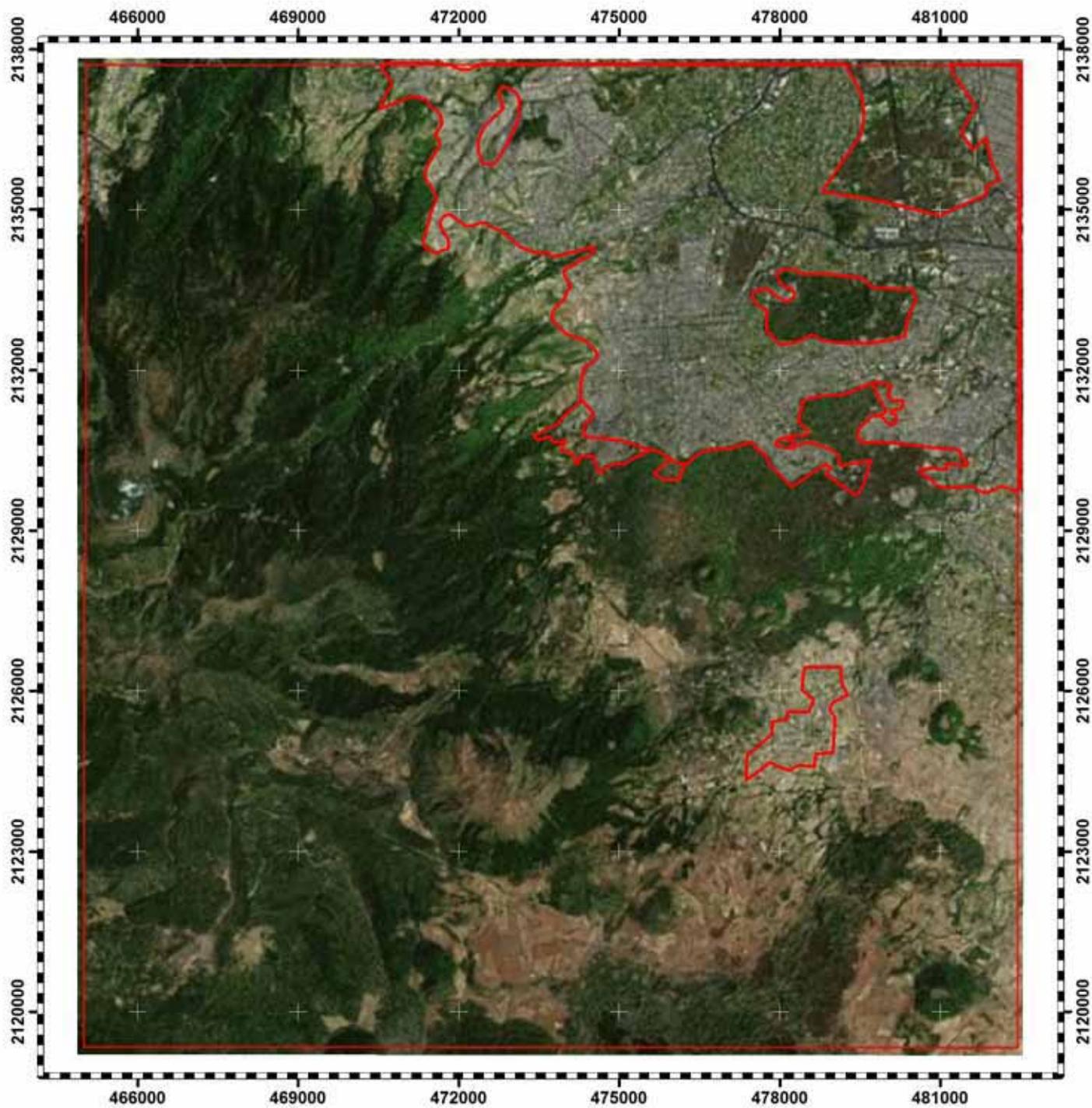
 Zona Urbana Superficie: 11576 ha

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGSn84



Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con imagen de satélite
Fondo: Imagen de satélite LANDSAT 8

SERIE V



 Zona Urbana Superficie: 6263 ha

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGSn84

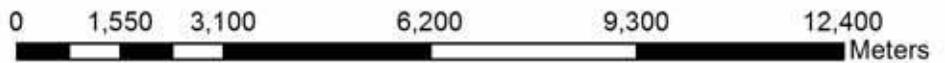
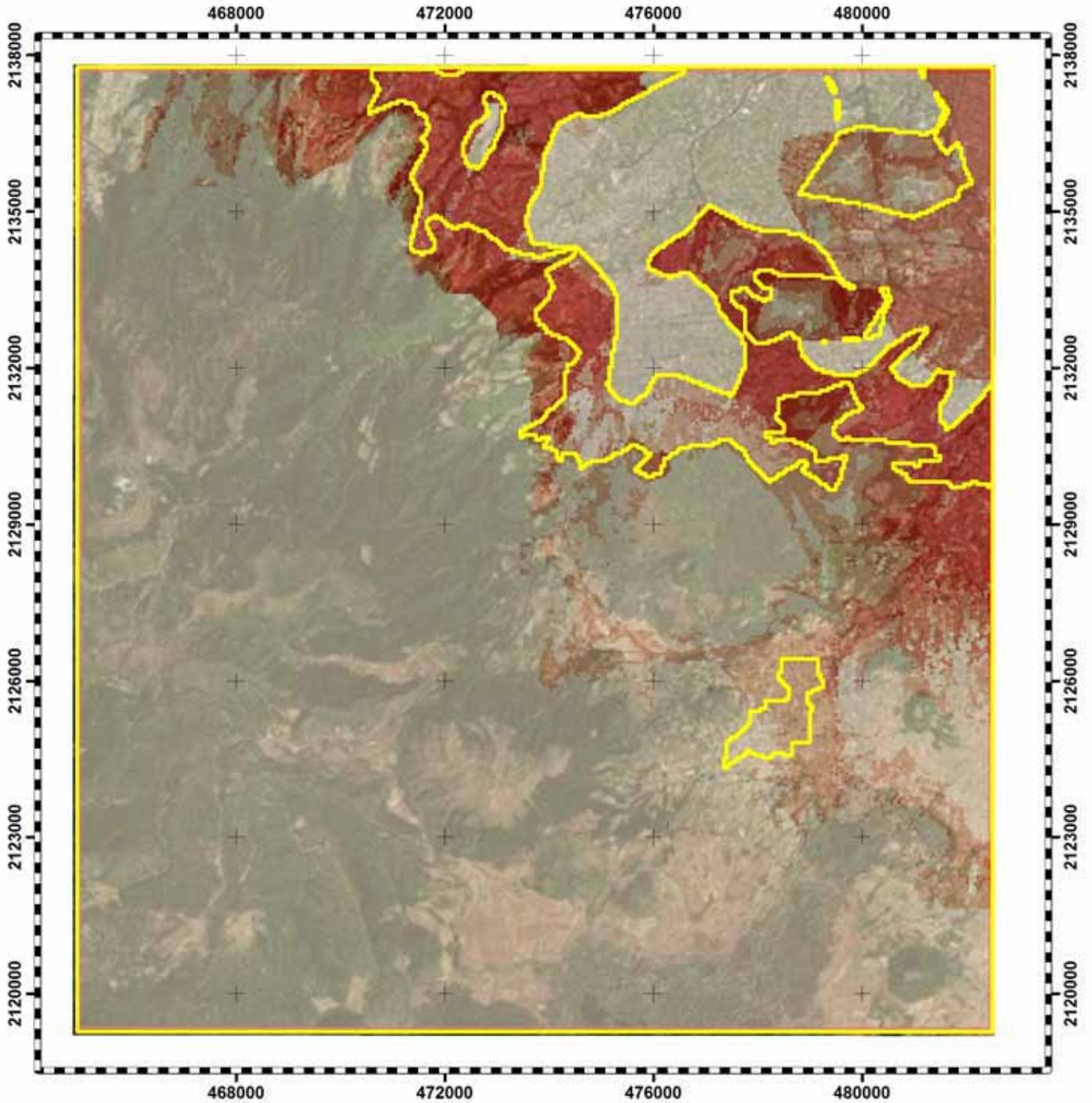


Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ANEXO 3

Cartografía de los escenarios construidos en base a la ecuación de regresión logística

ESCENARIO 1



Probabilidad de cambio

-  NADA PROBABLE
-  POCO PROBABLE
-  MUY PROBABLE
-  TOTALMENTE PROBABLE

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Zona: 14 Norte

Unidades: metros

Datum: WGS 84

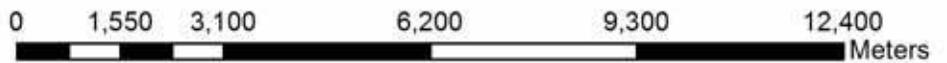
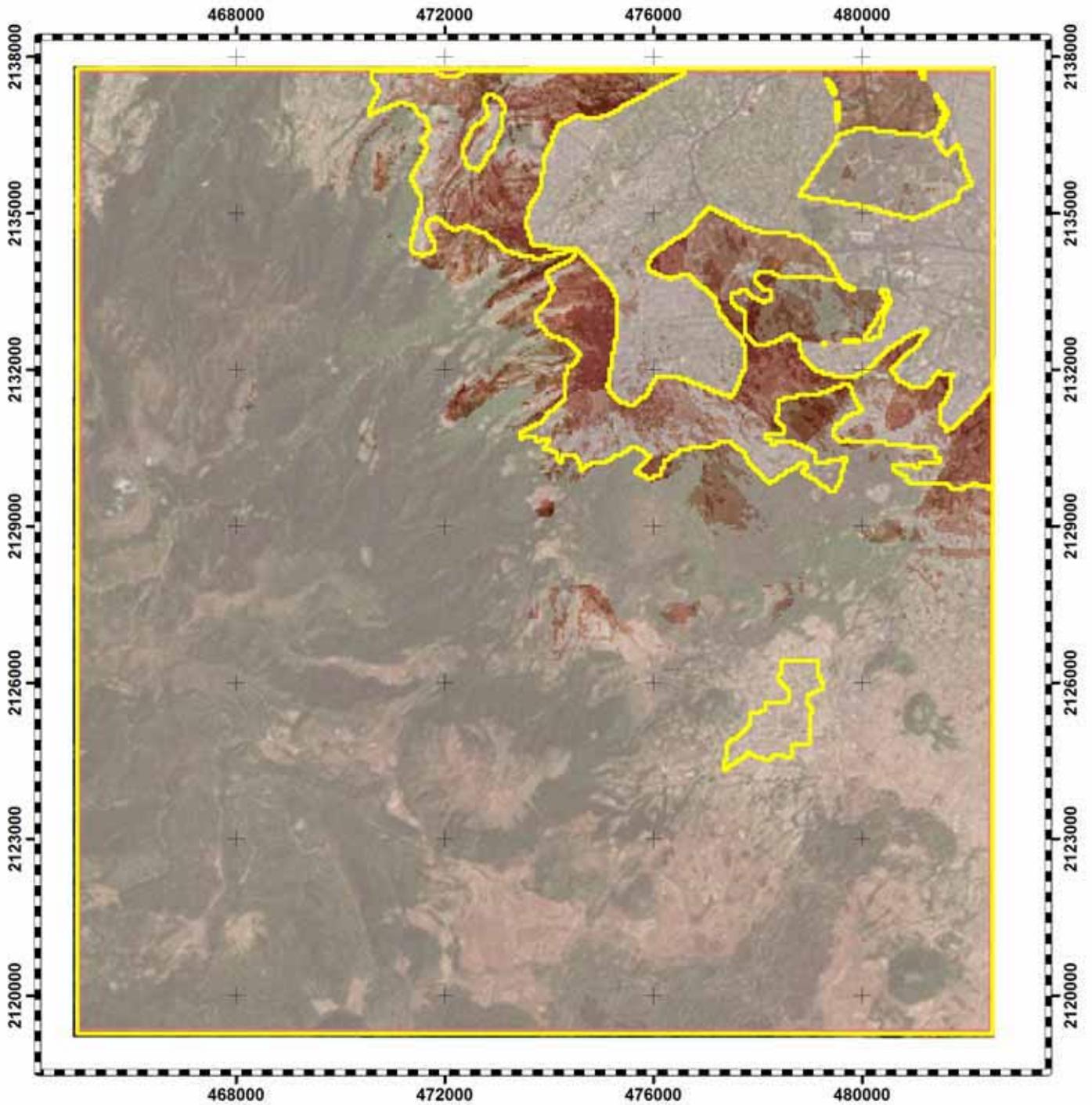
Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG

Fuente: Elaboración propia con datos de RL

Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial



ESCENARIO 2



Probabilidad de cambio

-  NADA PROBABLE
-  POCO PROBABLE
-  MUY PROBABLE
-  TOTALMENTE PROBABLE

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Zona: 14 Norte

Unidades: metros

Datum: WGS 84

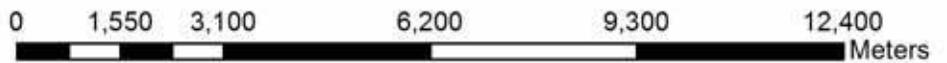
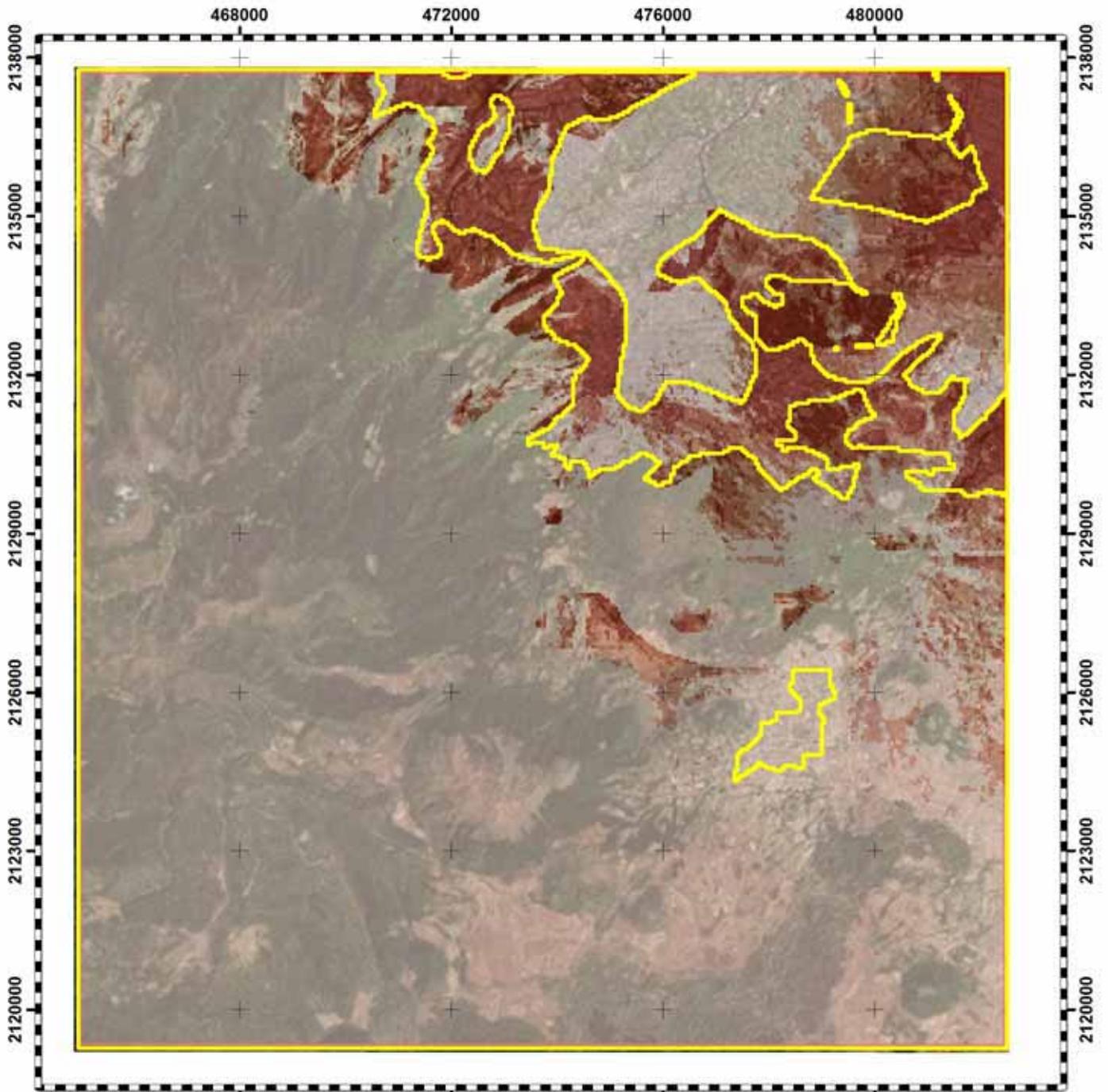


Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG

Fuente: Elaboración propia con datos de RL

Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ESCENARIO 3



Probabilidad de cambio

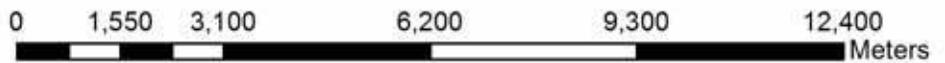
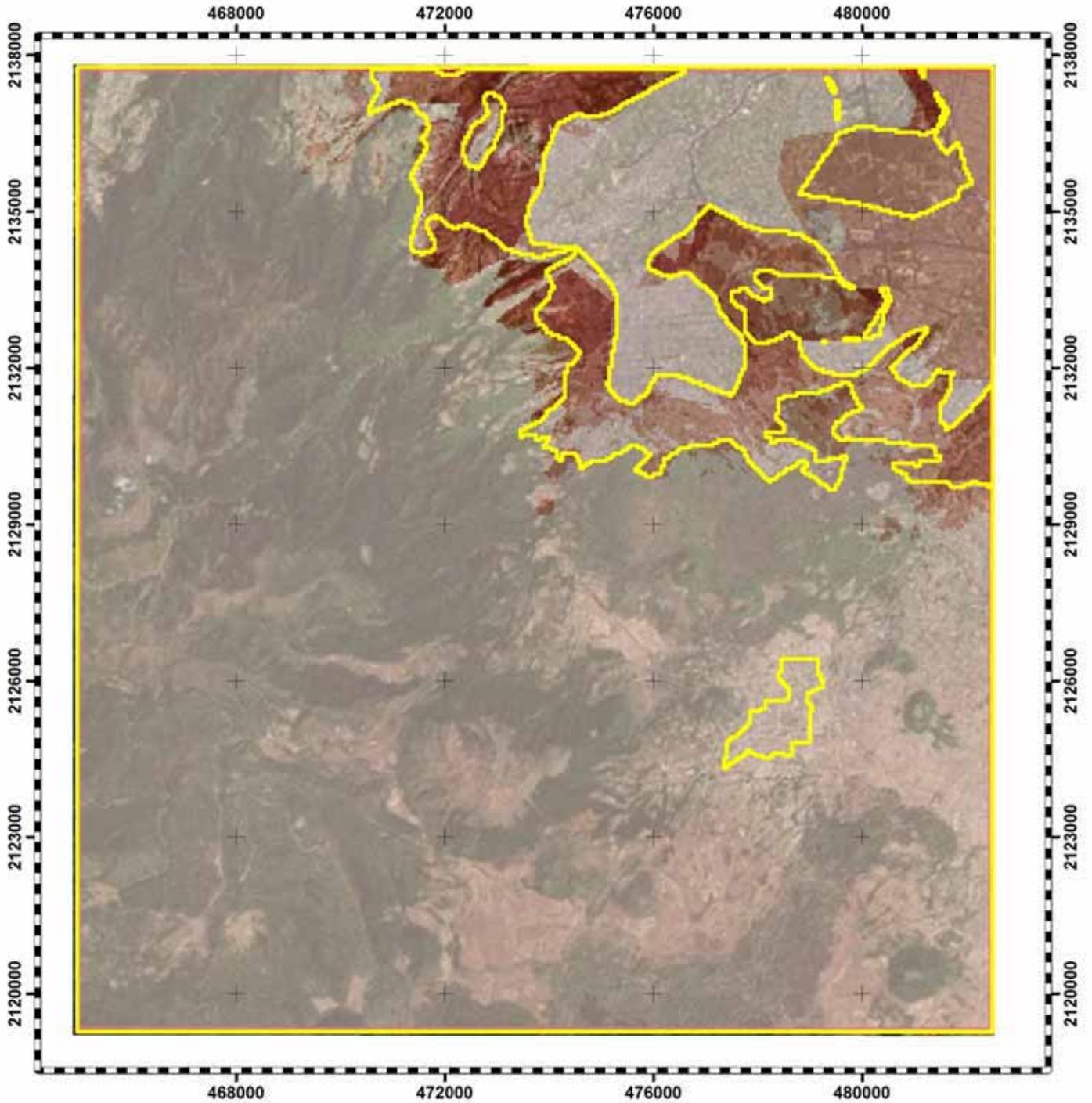
-  NADA PROBABLE
-  POCO PROBABLE
-  MUY PROBABLE
-  TOTALMENTE PROBABLE

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84



Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de RL
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ESCENARIO 4



Probabilidad de cambio

-  NADA PROBABLE
-  POCO PROBABLE
-  MUY PROBABLE
-  TOTALMENTE PROBABLE

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Zona: 14 Norte

Unidades: metros

Datum: WGS 84



Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG

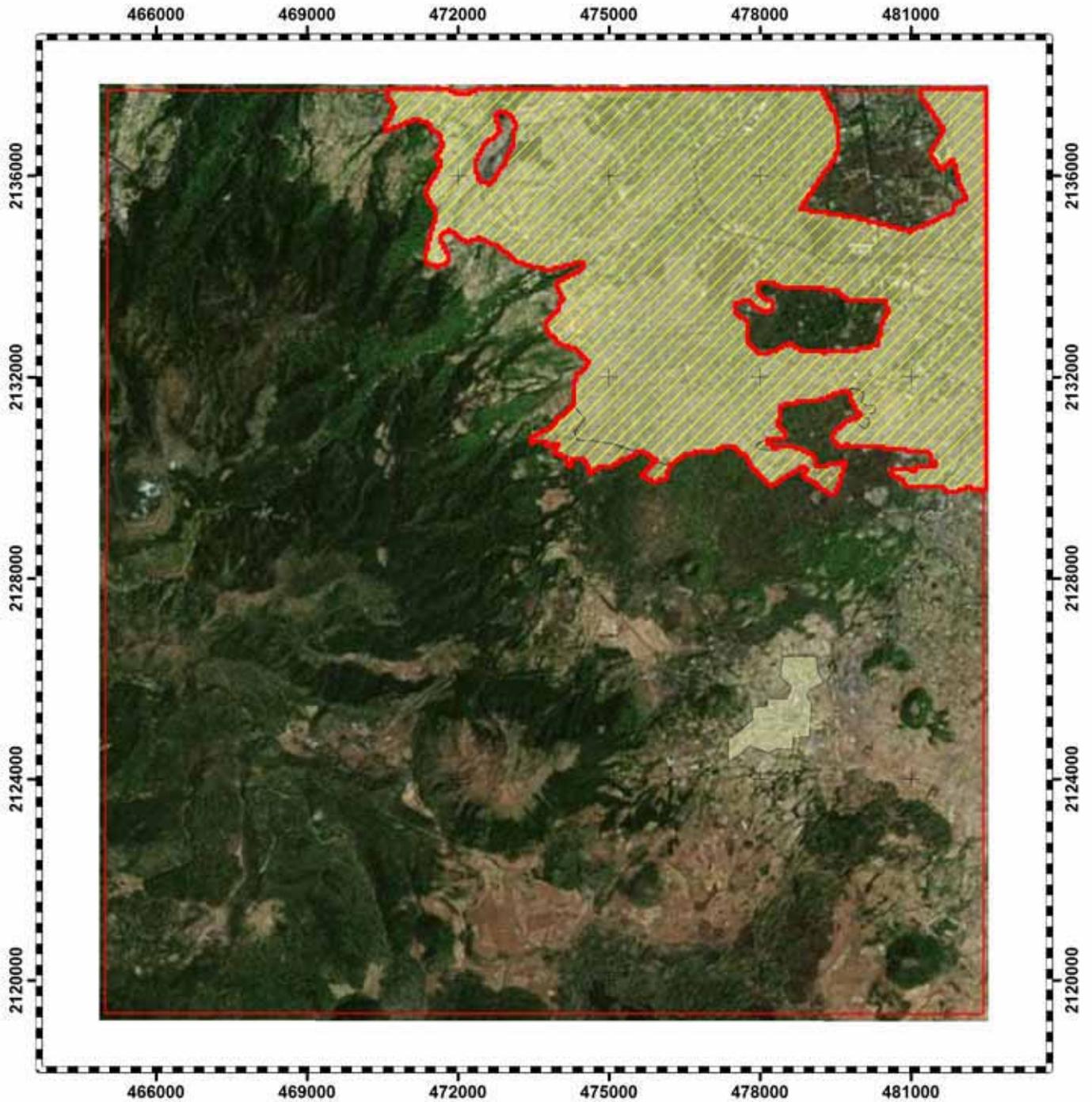
Fuente: Elaboración propia con datos de RL

Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ANEXO 4

Cartografía de los escenarios pronosticados para 2030 y 2045 en base a las cadenas de Markov

ESCENARIO 2030



0 1,500 3,000 6,000 9,000 12,000 Meters

 Zona Urbana 2030 MARKOV

 Zona Urbana serie V



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)

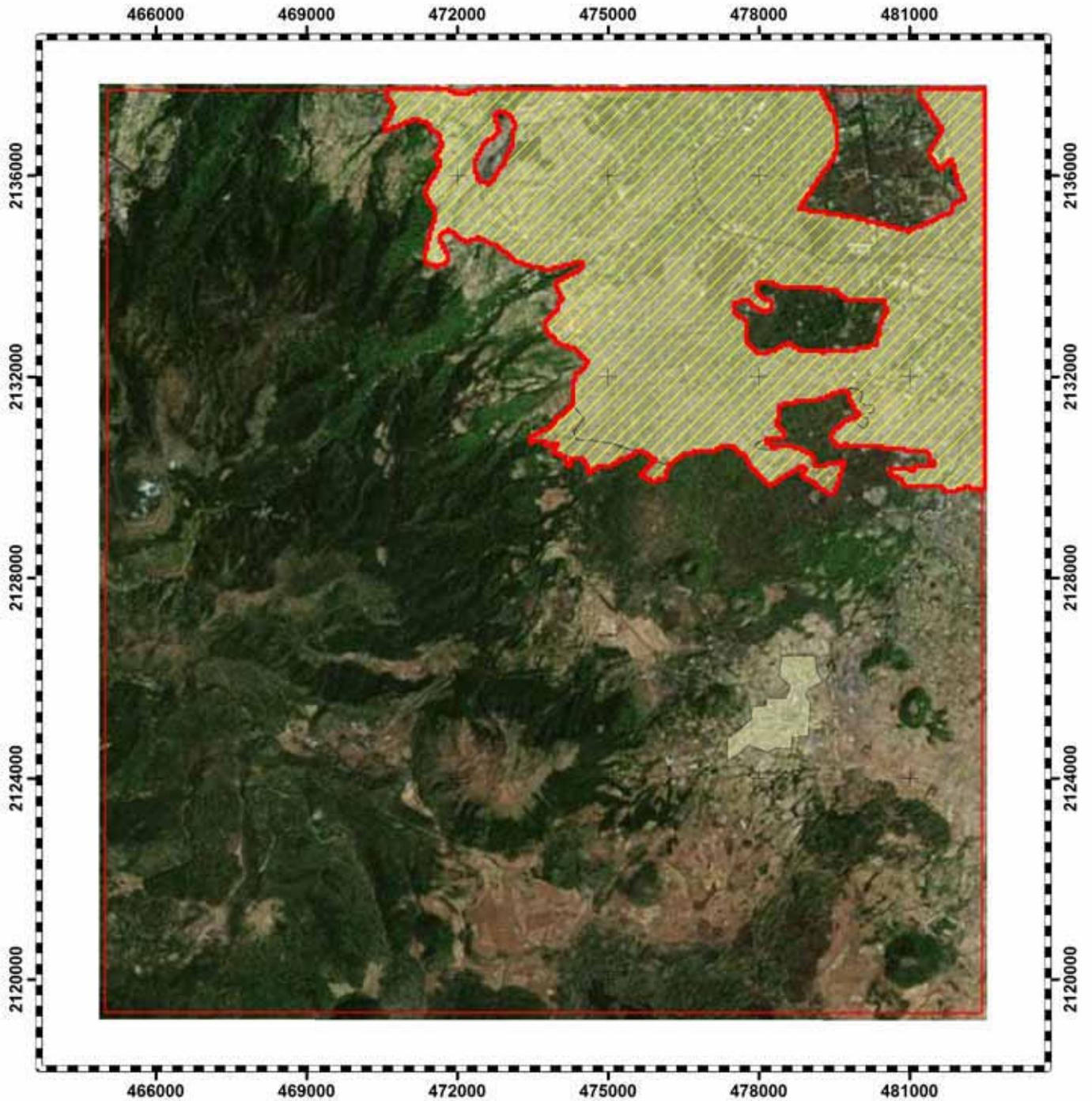
Zona: 14 Norte

Unidades: metros

Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de Cadenas de Markov
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ESCENARIO 2045



0 1,500 3,000 6,000 9,000 12,000 Meters

 Zona Urbana 2045 MARKOV

 Zona Urbana serie V



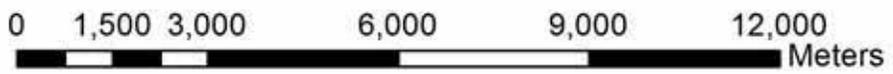
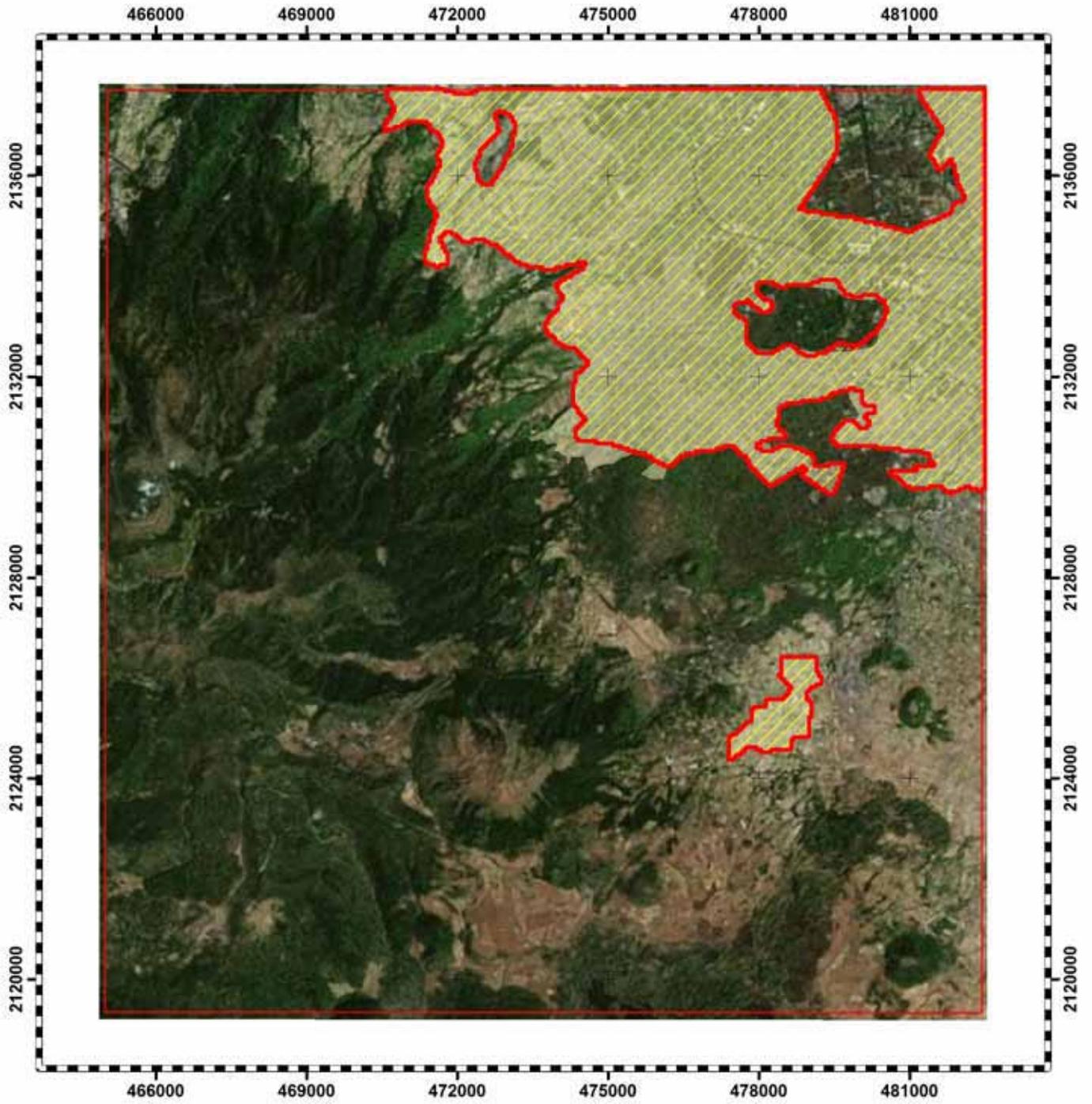
PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de Cadenas de Markov
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ANEXO 5

**Cartografía de los escenarios
pronosticados para 2030 y 2045 en base
a las cadenas de Markov y autómatas
celulares**

ESCENARIO 2030



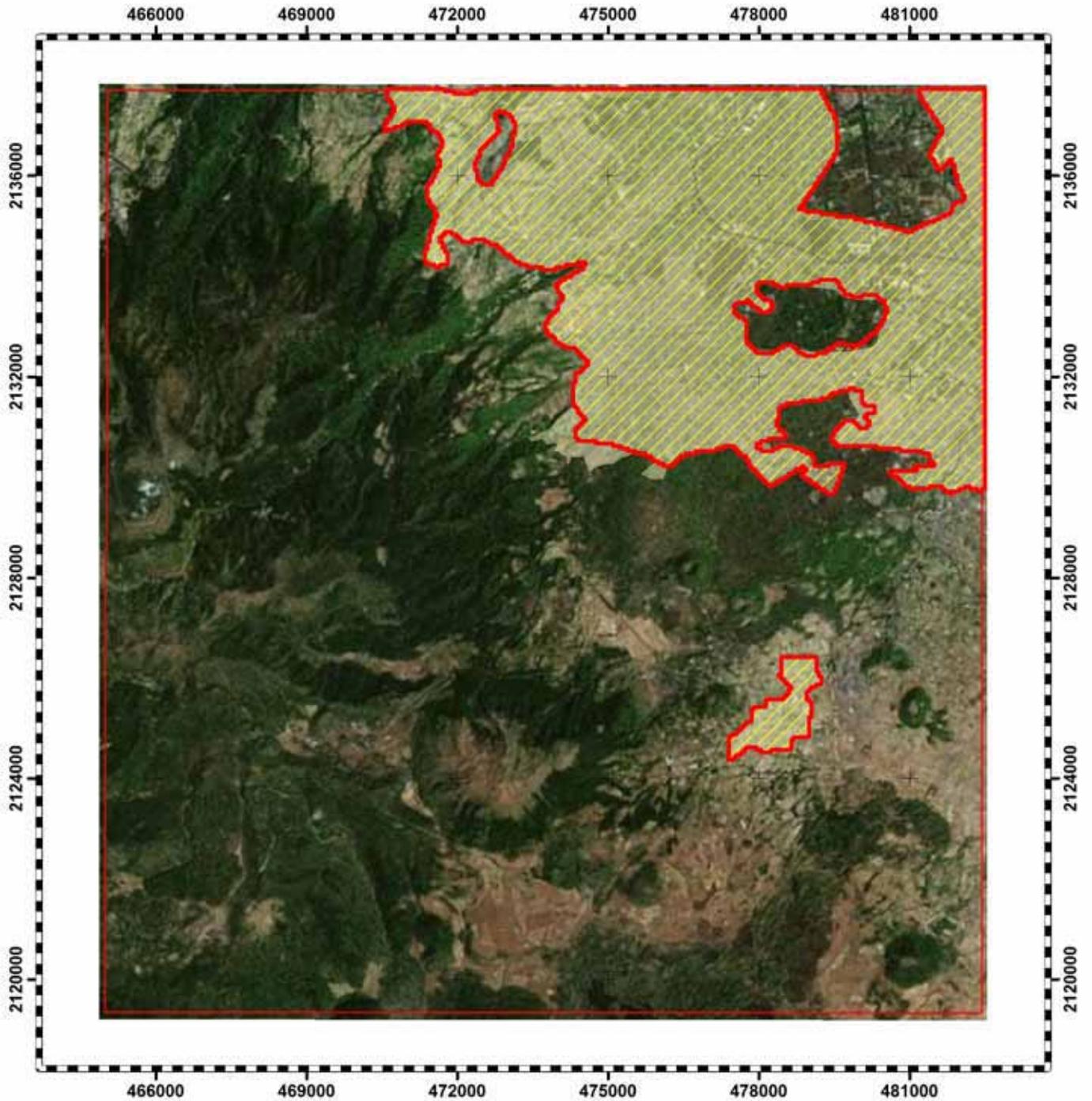
-  Zona Urbana 2030 CA_MARKOV
-  Zona Urbana serie V



PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de Cadenas de Markov y Automatas Celulares
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ESCENARIO 2045



0 1,500 3,000 6,000 9,000 12,000 Meters

-  Zona Urbana 2045 CA_MARKOV
-  Zona Urbana serie V



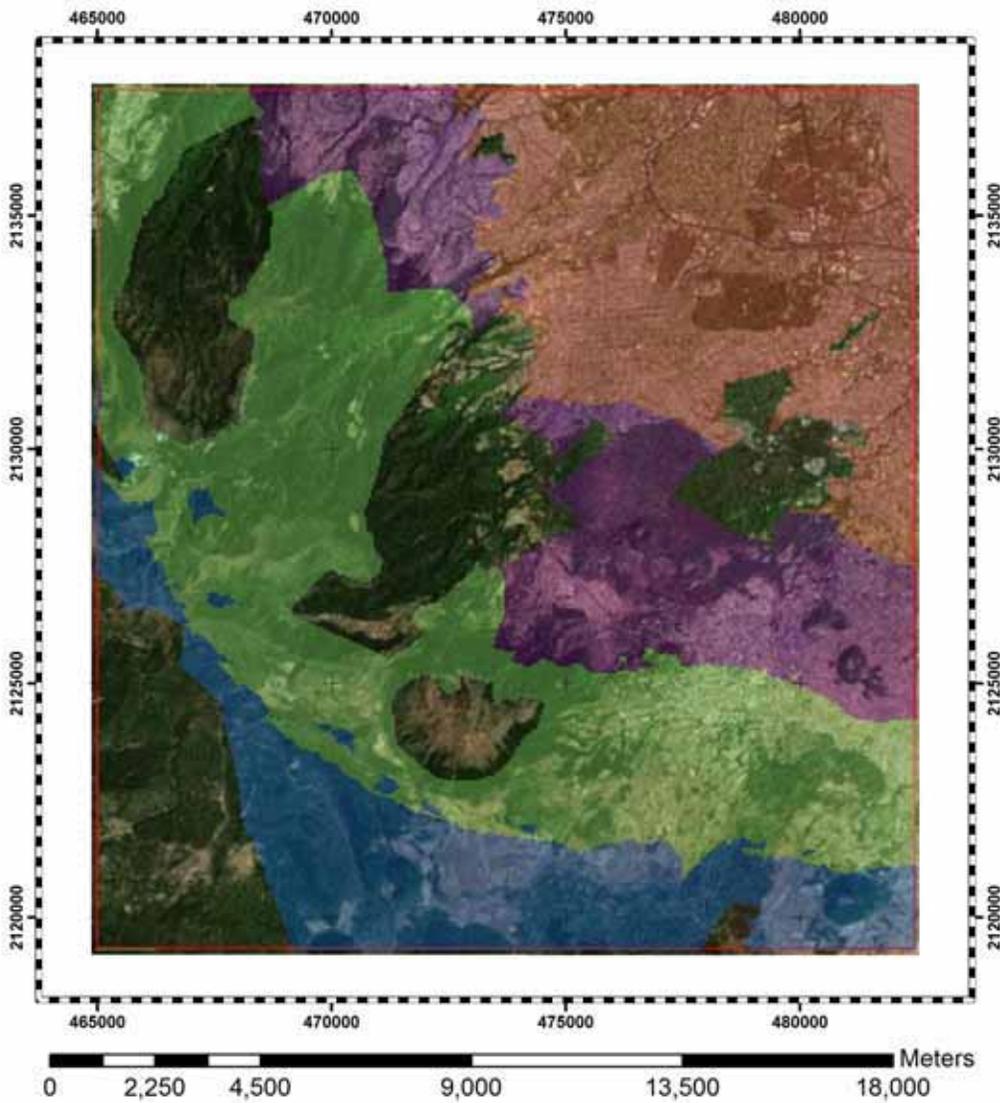
PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Norte
Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
Fuente: Elaboración propia con datos de Cadenas de Markov y Automatas Celulares
Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

ANEXO 6

Cartografía de la aptitud de uso de suelo urbano en base a MCE

Cartografía de las unidades ambientales de acuerdo al PGOEDF



ESCENARIO 2



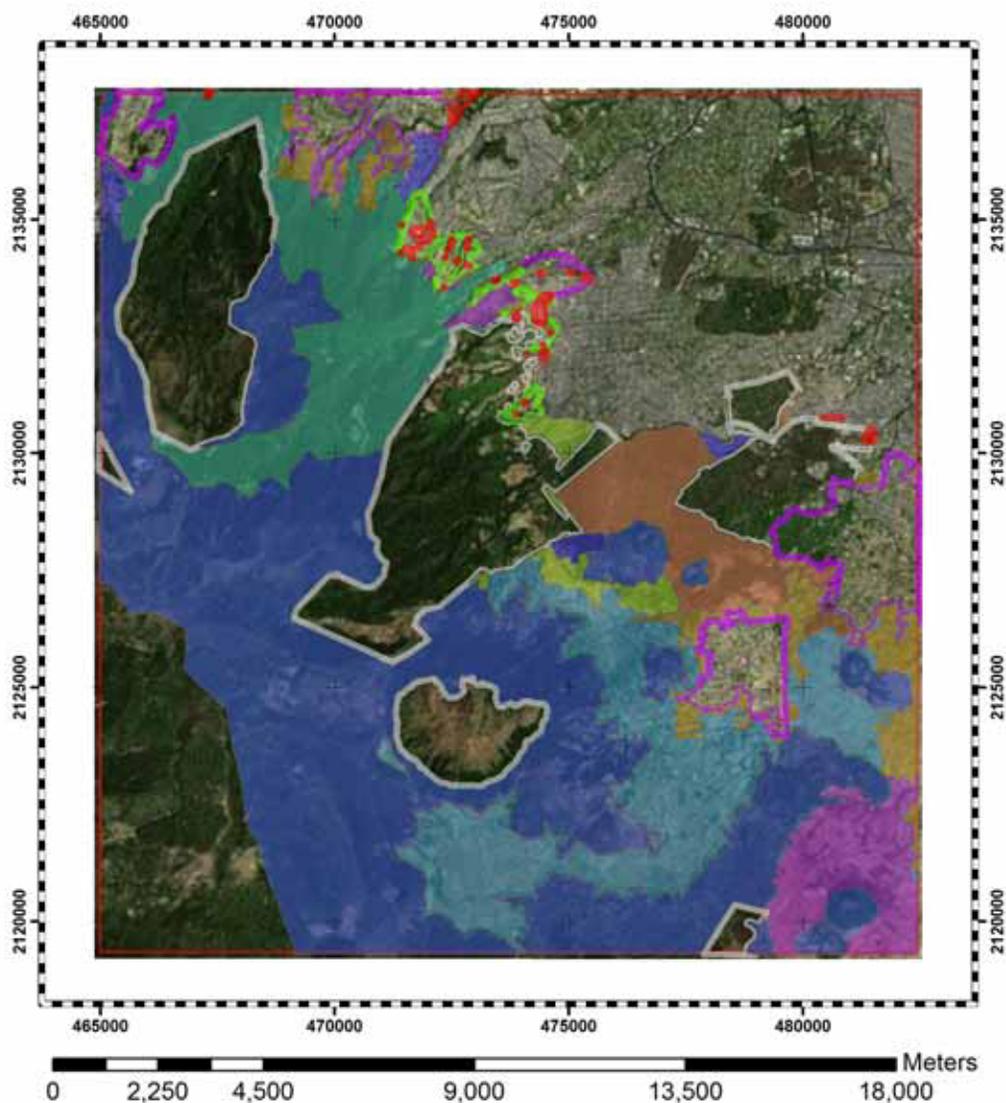
APTITUD DE SUELO URBANO

- NO APTO
- POCO APTO
- APTO
- MUY APTO

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Zona: 14 Norte
 Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
 Fuente: Elaboración propia con datos de MCE
 Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial

PGOEDF



UNIDADES AMBIENTALES

- Agroecológico
- Agroforestal
- Agroforestal Especial
- Areas Naturales Protegidas
- Equipamiento Rural
- Forestal de Conservacion
- Forestal de Conservacion Especial
- Forestal de Proteccion
- Forestal de Proteccion Especial
- Poblados Rurales
- Programas Parciales
- Zona Urbana

PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Zona: 14 Norte
 Unidades: metros Datum: WGS 84

Elaboración, Diseño y Edición Cartográfica: SVG
 Fuente: Elaboración propia con datos de PGOEDF
 Fondo: Imagen de satélite Bing Aerial