



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

CAMBIO DE USO DE SUELO POR CRECIMIENTO URBANO EN LA CUENCA DE METZTITLÁN, HIDALGO

MARÍA JOSEFA JIMÉNEZ MORENO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2010

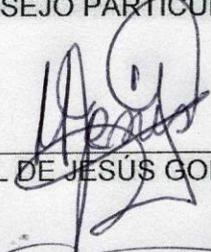
LA PRESENTE TESIS TITULADA " CAMBIO DE USO DE SUELO POR CRECIMIENTO URBANO EN LA CUENCA DE METZTITLÁN HIDALGO, REALIZADA POR LA ALUMNA MARÍA JOSEFA JIMÉNEZ MORENO " BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR INDICADO, HA SIDO APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

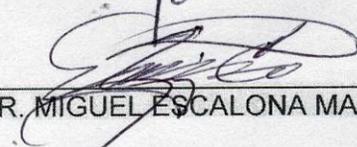
FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR

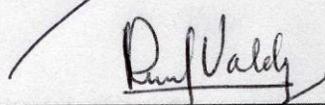
CONSEJERO


DR. MANUEL DE JESÚS GONZÁLEZ GUILLEN

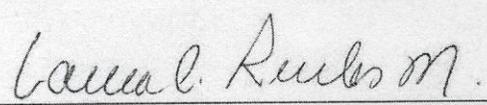
ASESOR


DR. MIGUEL ESCALONA MAURICE

ASESOR


DR. J. RENÉ VALDEZ LAZALDE

ASESOR


DRA. LAURA C. RUELAS MONJARDIN

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO, ABRIL DE 2010.

RESUMEN

Uno de los factores fundamentales en el incremento de las zonas urbanas es el crecimiento de la población. En este estudio se analizó y modeló el cambio de uso de suelo generado por el incremento de la población en las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán de la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo, con la finalidad de conocer y estimar el área de expansión urbana en los próximos años, contemplando los años 2010, 2015 y 2020 para fines de planificación urbana.

El segundo capítulo reporta un análisis comparativo de algunos métodos empleados en la detección y modelación del cambio de uso del suelo generado por el crecimiento urbano, el cual determinó que no existe un método específico para analizar la dinámica del cambio de uso de suelo urbano, ya que depende del aspecto a evaluar, de la calidad de información, de los costos de implementación y de las características del área de estudio.

El tercer capítulo se enfoca a la detección y modelación de cambio del uso del suelo generado por el incremento de la población en las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, donde se correlacionó el crecimiento urbano con algunas variables como los caminos principales, caminos secundarios, la cercanía a ríos y la pendiente del terreno. El modelo permitió estimar el crecimiento urbano a los años 2010, 2015 y 2020, concluyendo que el crecimiento de la población urbana es un factor importante en el crecimiento del área urbana pero no determinante, ya que el crecimiento urbano es afectado además por factores ambientales, patrones socioeconómicos y culturales, los cuales deben ser considerados en la planificación urbana.

Palabras clave: crecimiento urbano, planificación urbana, cambio de uso del suelo.

SUMMARY

One of the key factors of urban sprawl is urban population growth. In this study an analysis and modeling of land use changes generated by the increase in population in the cities of Atotonilco, Tulancingo and Zacualtipan located in the Metztitlan Basin, Hidalgo were carried out to understand and estimate the area of urban expansion in the years 2010, 2015 and 2020 for urban planning purposes. The second chapter reports a comparative analysis of some methods used in the detection and modeling of land use change generated by urban growth, which determined that there is no specific method to analyze the changing dynamics of urban land use generated by urban sprawl, which depends on the various factors such as purpose of the analysis, the quality of information, implementation costs, and the characteristics of the study area.

The third chapter focuses on change detection and modeling of land use generated by the increase in population in the cities of Atotonilco, Zacualtipán and Tulancingo. Urban sprawl is correlated with variables such as main roads, secondary roads, the proximity to rivers and terrain slope. The model allowed to estimate future urban growth in the years 2010, 2015 and 2020, concluding that the urban population growth is an important factor in the growth of urban areas, but not decisive, since urban sprawl is also affected by environmental factors, socioeconomic and cultural patterns, which must be considered in urban planning.

Keywords: urban growth, urban planning, land use change.

La presente investigación fue financiada con recursos de la Línea de Investigación 9: **“Geomática aplicada al estudio y manejo de los recursos naturales y sistemas agropecuarios”** del Colegio de Postgraduados.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo en mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados por brindarme en sus instalaciones las herramientas necesarias para mi formación.

A la Línea de Investigación 9 por su contribución en mi crecimiento profesional y humano.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo para la conclusión de la Tesis.

Al Dr. Manuel de Jesús González Guillén por su apoyo, paciencia y tiempo dedicado en la dirección de la tesis.

Al Dr. Miguel Jorge Escalona Maurice por su paciencia, consejos, compromiso y sugerencias en la conclusión de la tesis.

Al Dr. J. René Valdez Lazalde por sus valiosas observaciones y sugerencias.

Al Dr. Héctor de los Santos Posada por sus sugerencias.

Un agradecimiento especial a mi gran amigo Marcos Casiano Domínguez por sus conocimientos, sugerencias, paciencia y apoyo incondicional que hicieron posible la culminación de la tesis.

A todos, muchas gracias.

DEDICATORIA

A Dios por la vida, y por ser mi fuente indispensable para salir adelante en las adversidades.

A mis padres: Florencia Moreno y Vicente Jiménez por darme la vida, por su amor, comprensión, por apoyarme en todas mis decisiones, y por enseñarme que la vida es hermosa.

A mis hermanos por el amor, cariño, paciencia y apoyo imprescindible en todas las etapas de mi vida.

A mis sobrinos por su cariño, ocurrencias y la felicidad que siempre me brindan.

A mi tía Plácida y primos por su cariño y apoyo.

A la familia Hernández Martínez por brindarme su apoyo incondicional y por ser mi segunda familia.

A mis amigos: Marcos, Elvia, Eugenio, Hornín, Jeni, Liz, Joel, Lupita, Marche, Patricia, Piedad, Soledad, Vielka y a todos los no mencionados pero que han enriquecido mi vida.

INDICE GENERAL

	Página
INDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO I. CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE METZTITLÁN, HIDALGO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos de la investigación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	3
1.3 Características biofísicas y ambientales del área de estudio	3
1.3.1 Características generales del área de estudio (Nivel Cuenca)	3
1.3.2 Características específicas del área de estudio (Nivel Municipio)	6
1.4 Descripción de las condiciones sociodemográficos de los municipios estudiados.....	10
1.4.1 Población	11
1.4.2 Educación.....	16
1.4.3 Vivienda	17
1.4.4 Empleo.....	18
1.4.5 Inversión pública	20
1.4.6 Actividades económicas	21
1.5 Antecedentes históricos del área bajo estudio	27
1.6 Literatura citada	30
CAPÍTULO II. COMPARACIÓN DE MÉTODOS ESPACIALES PARA DETECTAR CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO URBANO	33
Resumen	33
Summary	33
2.1 Introducción	34
2.2 Métodos de análisis de cambio de uso del suelo	35
2.2.1 Clasificación de los métodos según las técnicas empleadas	36
2.2.2 Clasificación de los métodos según la temporalidad de la información	38
2.2.3 Incertidumbre en el estudio del cambio de uso del suelo	40
2.3 Aplicaciones de los métodos de detección de cambio en el uso suelo de áreas urbanas	41
2.4 Análisis comparativo de los métodos de detección de cambios en el uso del suelo en áreas urbanas	48

2.5 Conclusiones.....	49
2.6 Literatura citada	50
CAPÍTULO III. DETECCIÓN Y PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO POR CRECIMIENTO URBANO EN LA CUENCA DE METZTITLÁN, HIDALGO	54
Resumen	54
Summary	55
3.1 Introducción	56
Objetivos	57
3.2 Dinámica de la urbanización.....	58
3.3 Modelación del crecimiento urbano	59
3.4 Área de estudio	64
3.5 Metodología	65
3.5.1 Georeferenciación de las fotografías aéreas	66
3.5.2 Digitalización de áreas urbanas	66
3.5.3 Detección de áreas de cambio.....	67
3.5.4 Modelación de escenarios del crecimiento urbano	68
3.6 Resultados y discusión	70
3.6.1 Georeferenciación y digitalización de áreas urbanas	70
3.6.2 Detección del cambio de uso de suelo urbano	70
3.6.3 Modelación del crecimiento urbano	76
3.7 Conclusiones.....	89
3.8 Literatura citada	90
CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN GENERAL Y RECOMENDACIONES	94
4.1 Conclusiones.....	98
4.2 Recomendaciones	99
4.3 Literatura citada	100
ANEXO	101

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1.1. Localización geográfica de los municipios.....	7
1.2. Superficie de la cuenca de Metztlán y municipios estudiados.....	8
1.3. Superficie no parcelada y tipos de uso en los municipios estudiados.....	9
1.4. Tasa de crecimiento media anual de los municipios estudiados y de Hidalgo....	13
1.5. Porcentaje de la población alfabeta de 15 y más años por sexo de los municipios estudiados y del estado de Hidalgo.....	17
1.6. Producción agrícola de riego y temporal de los municipios estudiados (ton).....	23
1.7. Producción ganadera de los municipios estudiados (ton).....	24
1.8. Superficie destinada a la ganadería en los municipios estudiados (ha).....	25
1.9. Información de las actividades económicas manufactureras de los municipios estudiados.....	26
1.10. Población empleada en las diferentes industrias.....	27
2.1. Clasificación de métodos (detección y predicción) de cambio de uso del suelo, así como los datos requeridos, productos obtenidos, información relevante, ventajas y desventajas y referencia de cada uno.....	44
3.1. Datos de las fotografías aéreas usadas en el estudio.....	65
3.2. Datos de las ortofotografías.....	65
3.3. Parámetros de georeferencia de las fotografías aéreas de las tres ciudades. ..	70
3.4. Superficie de cambio obtenido con las técnicas de diferencia de imagen y cruce de tablas.....	71
3.5. Medidas de correlación del Cruce de Tablas para las ciudades bajo estudio....	76
3.6. Datos estadísticos de las variables dependientes e independientes para cada ciudad.....	82
3.7. Resumen estadístico del modelo logístico para cada ciudad.....	84
3.8. Superficie y densidad de la población para cada ciudad bajo estudio.....	85
3.9. Porcentaje de cambio de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1. Localización de la Cuenca de Metztitlán.....	4
1.2. Red hidrológica de la Cuenca de Metztitlán.	6
1.3. Localización de los municipios bajo estudio.	7
1.4. Superficie parcelada de los municipios estudiados.....	9
1.5. Tendencia de la población de los municipios estudiados de 1950 a 2005.	12
1.6. Tasa de natalidad y mortalidad en los municipios estudiados.....	14
1.7. Población rural y urbana en los municipios estudiados y del estado de Hidalgo.	16
1.8. Casas habitación en los municipios estudiados y en el estado de Hidalgo.	18
1.9. Población económicamente activa de los municipios estudiados y a nivel del estado de Hidalgo.	20
2.1. Técnicas de detección de cambio basadas en la teledetección.....	40
3.1. Localización de las ciudades bajo estudio.	64
3.2. Digitalización de la ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c). ..	73
3.3. Detección de cambio para la Ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c) con la técnica de diferencia de imágenes.	74
3.4. Detección de cambio para la Ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c) con la técnica de Cruce de Tablas.	75
3.5. Caminos principales de la ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c).	78
3.6. Caminos secundarios de la ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c).....	79
3.7. Cercanía a ríos de la ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c).	80
3.8. Pendiente de la ciudad de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c).	81
3.9. Probabilidades de cambio de Atotonilco (a), Tulancingo (b) y Zacualtipán (c). ..	83
3.10. Escenario de cambio de uso de suelo urbano para Atotonilco en 2010 (a), 2015 (b) y 2020 (c).	86
3.11. Escenario de cambio de uso de suelo urbano para Tulancingo en 2010 (a), 2015 (b) y 2020 (c).	87
3.12. Escenario de cambio de uso de suelo urbano para Zacualtipán en 2010 (a), 2015 (b) y 2020 (c).	88

CAPÍTULO I

CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE METZTITLÁN, HIDALGO

1.1 Introducción

La aptitud del suelo es la capacidad natural o modificada de éste para soportar un uso definido, y depende principalmente de las características biofísicas y ambientales de cada ecosistema terrestre. La aptitud del suelo puede ser modificada por las acciones humanas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000) a través del cambio de uso del suelo, el cual ha sido el principal motor en la modificación del paisaje (Ramankutty *et al.*, 2005; Velásquez *et al.*, 2002).

Los cambios de uso del suelo durante el siglo veinte han surgido como un proceso a diferentes escalas espaciales con consecuencias en el sistema terrestre (Ramankutty *et al.*, 2005). Una de las principales causas de estos cambios de uso, a nivel local, regional y global, lo constituye la presión directa e indirecta que ejerce el hombre sobre los recursos naturales. A nivel local, tales cambios inducen la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima y pérdida de la biodiversidad de especies; a nivel regional, estos cambios afectan el funcionamiento de cuencas hidrográficas y de asentamientos humanos; y a nivel global, ellos coadyuvan a las emisiones de gases de efecto invernadero (Bocco *et al.*, 2001).

Los cambios de uso del suelo están transformando la cobertura del territorio a un ritmo acelerado, existiendo una relación directa entre éstos y el crecimiento urbano, derivado del incremento en el tamaño de la población y el número de viviendas (López, 2001). En la actualidad, los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios de la cobertura del suelo y la deforestación son importantes y necesarios, porque ellos proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, pérdida de la biodiversidad y una adecuada planificación del desarrollo de una región determinada (Lambin *et al.*, 2005).

El aumento disperso y desordenado de la población es un factor decisivo en los patrones de cambio de uso del suelo y en el aprovechamiento de los recursos naturales. La falta de planificación de estos procesos ha provocado serios problemas de degradación de los recursos naturales, siendo uno de los mayores retos el detener o disminuir tal degradación, buscando opciones de solución en forma organizada y activa, con base en los conocimientos de las vicisitudes de la naturaleza y en el comportamiento del hombre durante el proceso histórico al que ha estado sometido (Medina, 1998).

La población de la Cuenca de Metztitlán ubicada en el estado de Hidalgo ha crecido acelerada y desordenadamente en los últimos años, afectando sus componentes biofísicos y ambientales, por lo que es necesario realizar un análisis que permita identificar y diagnosticar las áreas sensibles, así como determinar los patrones generadores de los cambios de uso del suelo debido al desarrollo. También es importante estimar la probabilidad de cambio futuro que permita conocer el efecto de determinadas políticas de planificación sobre el crecimiento y desarrollo urbano de la cuenca. El objetivo fundamental de este estudio es contribuir al conocimiento de los cambios de uso del suelo en la región, así como determinar los patrones que los inducen, con la finalidad de contar con una herramienta de planificación para la toma de decisiones, y tratar de ordenar el crecimiento futuro de las zonas urbanas de los municipios con mayor desarrollo urbano dentro de la Cuenca de Metztitlán.

1.2 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Analizar la dinámica de cambios de uso del suelo por crecimiento urbano y estimar la probabilidad de cambio futuro del avance urbano en tres ciudades de la cuenca de Metztitlán, Hidalgo.

Objetivos específicos

- a. Identificar, analizar y cartografiar el cambio de uso del suelo en áreas de crecimiento urbano de las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, Hidalgo en el periodo de 1977 a 1995.

- b. Estimar la probabilidad de cambio futuro del avance urbano para el año 2015 de las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán de la cuenca de Metztitlán, Hidalgo.

1.3 Características biofísicas y ambientales del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo, específicamente en los municipios de Atotonilco el Grande, Tulancingo de Bravo, y Zacualtipán de Ángeles. A continuación se describen las características de las áreas geográficas estudiadas.

1.3.1 Características generales del área de estudio (Nivel Cuenca)

La Cuenca de Metztitlán pertenece al estado de Hidalgo. En ella se encuentran asentadas 560 poblaciones en 18 municipios que son: Acatlán, Acaxochitlán, Agua Blanca de Iturbide, Atotonilco el Grande, Cuauhtepic de Hinojosa, Eloxochitlan, Epzoyucan, Huasca de Ocampo, Metepec, Metztitlán, Mineral del Monte, Omitlán de Juárez, San Agustín Metztitlán, Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Singuilucan, Tenango de Doria, Tulancingo de Bravo y Zacualtipán de Ángeles (INEGI, 2006).

Localización de la Cuenca de Metztitlán

La Cuenca de Metztitlán se ubica geográficamente entre los paralelos de 20° 47' 49" y 19° 53' 46" de Latitud Norte y entre los meridianos 98° 48' 32" y 98° 2' 20" de Longitud Oeste a una altitud promedio de 1,320 m (Enciclopedia de los Municipios del Estado de Hidalgo, 2005). Se origina en Puebla y sus aguas se depositan en la laguna de Metztitlán con el nombre de río Tulancingo; su área de influencia de la Cuenca abarca los estados de Puebla, Veracruz de la Llave e Hidalgo (Figura 1.1). En este

último estado se enmarca la mayor parte de su extensión y el depósito de sus aguas. La Cuenca de Metztlán tiene gran importancia por su extensa superficie y la cantidad de afluentes que alimentan sus corrientes principales, así como por los distritos de riego que se ubican en ella, de los cuales destaca el 08 de Metztlán y el 028 de Tulancingo, este último es uno de los más importantes del país después de los Distritos de Riego del norte de la República (INEGI, 2006).

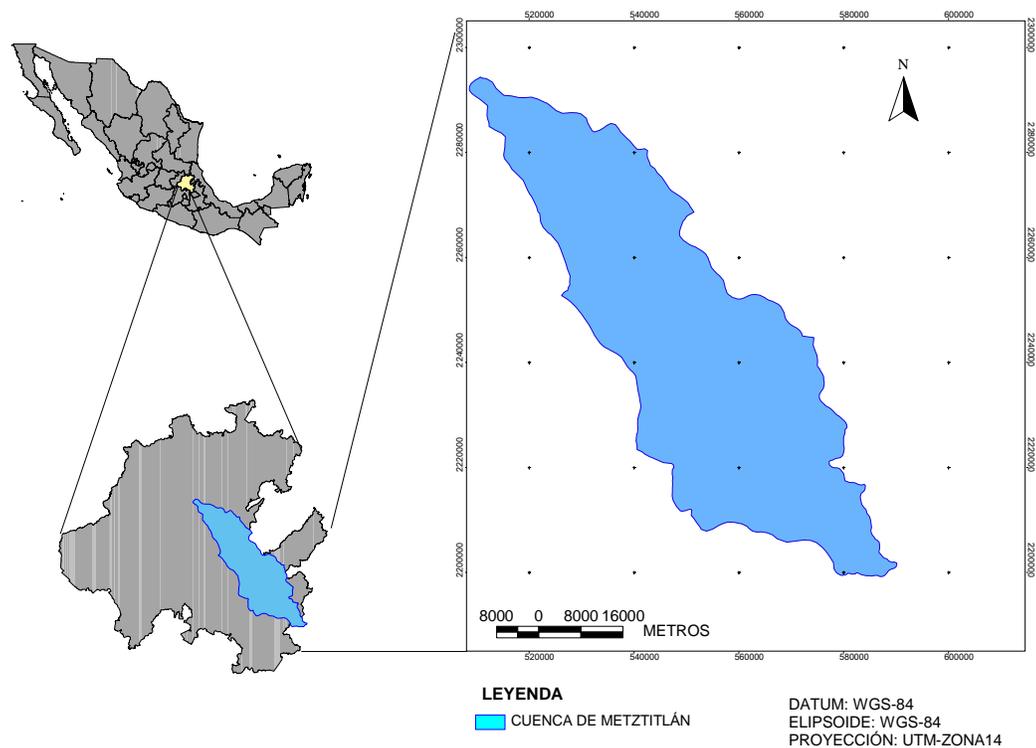


FIGURA 1.1. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DE METZTILÁN.

Orografía

La Cuenca de Metztlán se localiza principalmente en el Eje Neovolcánico, en una pequeña parte de la Sierra Madre Oriental y de la provincia del Carso Huasteco.

En general, la parte alta de la cuenca (Tulancingo de Bravo) se ubica dentro del Eje Neovolcánico, formada principalmente por llanuras y por sierra en menor proporción, su topografía es semi-plana, cortada por cañadas, barrancas, cerros y volcanes. La

parte intermedia (Atotonilco el Grande) pertenece a la Sierra Madre Oriental, y está formada por cañones. En tanto que la parte baja (Zacualtipán de Ángeles) pertenece a la Sierra Madre Oriental y una pequeña parte al Eje Neovolcánico y a la subprovincia Carso Huasteco, constituida por meseta y cañones; la mayor parte del área es plana con algunos cerros y relieves ondulados.

Clima

La Cuenca de Metztitlán presenta climas muy variados debido a su relieve, y ubicación. Los climas predominantes son tipo A (semi-cálidos), B (seco o áridos), y C (templados); la temperatura anual promedio de la cuenca es de 20.2 °C con clima templado-subcálido y una precipitación pluvial de 437 mm anuales. El período de lluvias es de junio a septiembre (García, 1973; INEGI, 2006).

Hidrografía

En la parte alta de la cuenca se origina el Río de Metztitlán, en los límites del estado de Puebla, con escurrimientos del Cerro Tlachaloya formando el Río Hiscongo, posteriormente da origen al Río Chico de Tulancingo, el cual también es formado por escurrimientos de Cuasesengo y La Paila, después dan origen al Río San Lorenzo, el cual origina el Río Grande de Tulancingo. Se cuenta también con regiones de cuencas y subcuencas, por ejemplo la del Pánuco, Tuxpan-Nautla, y cuerpos de agua, denominados Los Álamos, Otontepec, San Alejo y La Ciénega. La parte intermedia se ubica dentro de la región del Río Pánuco y la Cuenca del Río Moctezuma y cuenta con el Río “Grande de Tulancingo” y el del “Amajac”. En tanto, en la parte baja de la cuenca continua el Río Pánuco, donde se encuentra el Río Zoyatla y Miniahuaco, y la laguna de Chapultepec, entre otros cuerpos de agua (Figura 1.2) (INEGI, 2006).

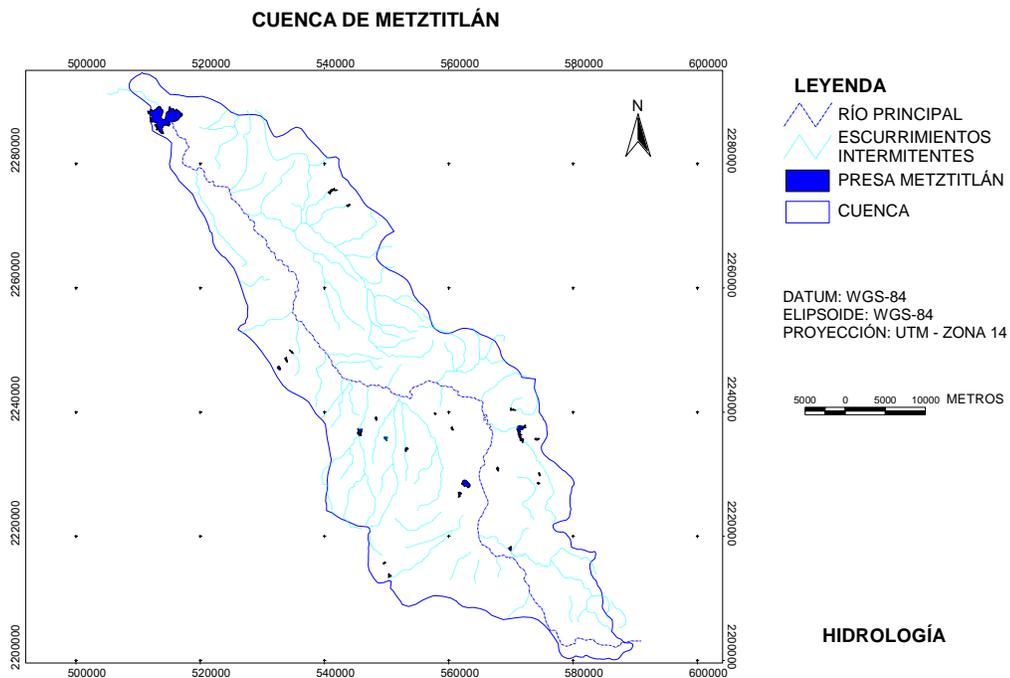


FIGURA 1.2. RED HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE METZTITLÁN.

Uso actual del suelo

El uso general del suelo en toda la cuenca es de agostadero y una pequeña parte de uso agrícola. Específicamente en la parte alta el suelo es semi-desértico, rico en materia orgánica y nutrimentos, el 60.8% es de uso agrícola de temporal y de riego, le sigue el uso forestal y por último el de agostadero. En la parte intermedia el uso es agrícola (riego y temporal) y pecuario, las áreas de praderas y pastizales son destinadas a ganado ovino, bovino y caprino principalmente, y el uso del bosque es para la obtención de productos maderables. En la parte baja de la cuenca el uso del suelo es principalmente forestal (INEGI, 2001).

1.3.2 Características específicas del área de estudio (Nivel Municipio)

El estudio se orientó a identificar y analizar los patrones de cambios de uso del suelo específicamente en los municipios de Tulancingo de Bravo, Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles localizados en la parte alta, media y baja respectivamente de

la Cuenca de Metztitlán (Figura 1.3 y Cuadro 1.1). Se seleccionaron esos municipios debido a que ahí se encuentran las ciudades de mayor crecimiento poblacional en la Cuenca de Metztitlán. Además, las diferentes características fisiográficas, tipos de uso del suelo, así como las diferentes actividades productivas de los municipios de interés han impactado severamente los componentes biofísicos de los ecosistemas de la cuenca. Lo anterior, permitirá dar una muestra representativa de los procesos dinámicos de cambios de uso del suelo por crecimiento urbano en la Cuenca de Metztitlán. A continuación se describen los municipios estudiados:

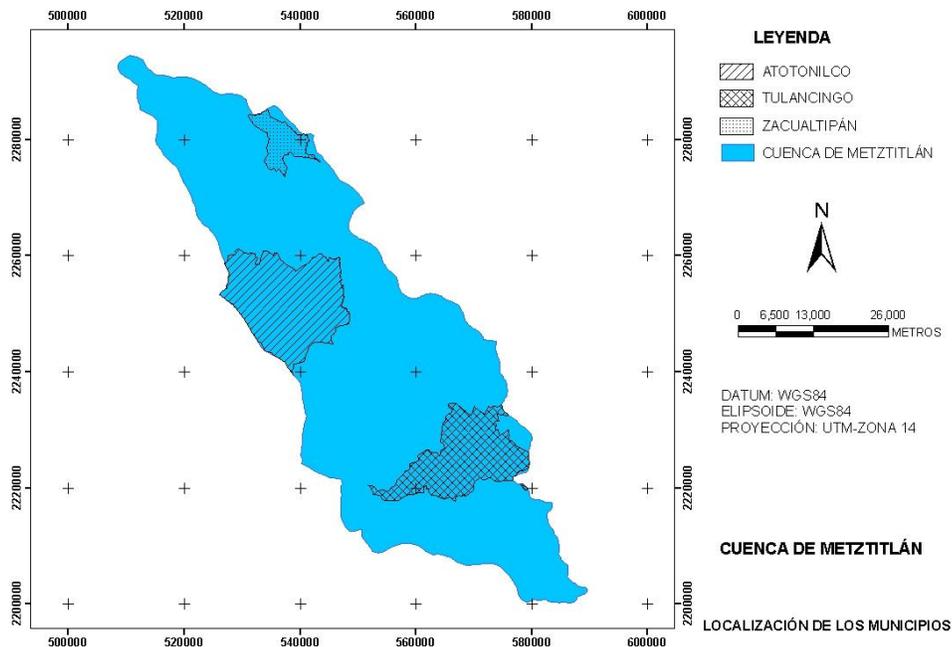


FIGURA 1.3. LOCALIZACIÓN DE LOS MUNICIPIOS BAJO ESTUDIO.

Cuadro 1.1. Localización geográfica de los municipios.

Municipio	Coordenadas UTM			
	X mínima	Y mínima	X máxima	Y máxima
Atotonilco El Grande	524000	2240000	548000	2260000
Tulancingo de Bravo	554000	2215000	578000	2235000
Zacualtipán de Angeles	530000	2275000	542000	2285000

INEGI (2000a).

Superficie de los municipios estudiados

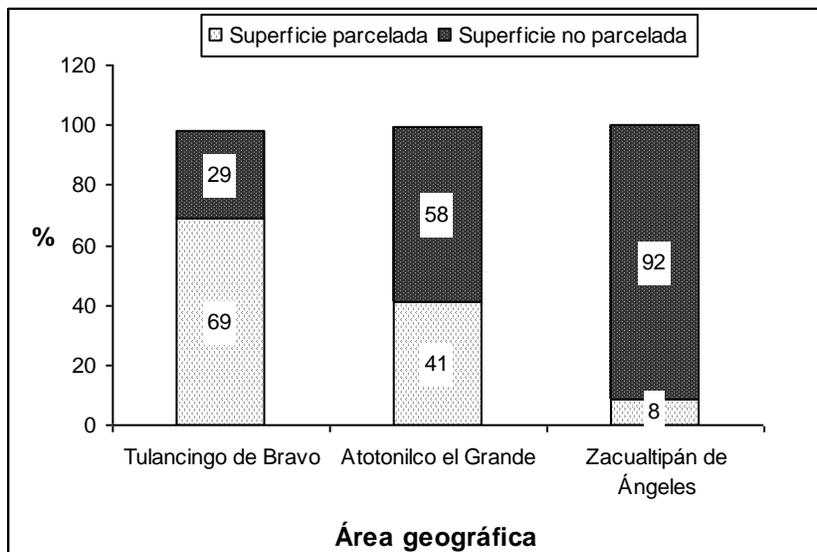
El área de la Cuenca de Metztitlán representa el 11% de la superficie estatal. La superficie cubierta por los tres municipios estudiados cubre una extensión total de 35% de la superficie total de la cuenca, cubriendo un 15%, 11% y 9% los municipios de Atotonilco el Grande, Tulancingo de Bravo y Zacualtipán de Ángeles, respectivamente (Cuadro 1.2). Los municipios estudiados destacan principalmente por su desarrollo urbano aunque también su desarrollo agrícola es importante a nivel cuenca, estado y nacional.

Cuadro 1.2. Superficie de la cuenca de Metztitlán y municipios estudiados.

<i>Área geográfica</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Superficie en la cuenca (%)</i>	<i>Superficie en el estado (%)</i>
Cuenca	282,615.32	100.0	11.0
Atotonilco el Grande	42,660.00	15.0	1.5
Tulancingo de Bravo	29,040.00	11.0	1.0
Zacualtipán de Ángeles	24,160.00	9.0	1.0

INEGI (2000a).

De la superficie con la que cuenta Tulancingo de Bravo, el 69% es parcelada; sin embargo, Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles cuentan solo con el 41% y 8% del área parcelada, respectivamente (Figura 1.4). Los usos principales de la superficie parcelada incluyen: Asentamientos urbanos, actividad agrícola y ganadera principalmente.



Fuente: INEGI (2005).

FIGURA 1.4. SUPERFICIE PARCELADA DE LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS.

Del total de la superficie no parcelada en los tres municipios se cuenta con tres tipos de usos principales: Comunal, de asentamiento humano y reserva de crecimiento urbano. En cuanto al área comunal, Atotonilco el Grande cuenta con 91%, Tulancingo de Bravo con 79%, y Zacualtipán de Ángeles con 99%; mientras que el uso de asentamientos urbanos y de reserva de crecimiento, en Atotonilco el Grande presenta el 9%, en Tulancingo de Bravo un 30%, y Zacualtipán de Ángeles un porcentaje menor (1.0%) (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Superficie no parcelada y tipos de uso en los municipios estudiados.

<i>Tipo de uso</i>	<i>Atotonilco el Grande (%)</i>	<i>Tulancingo de Bravo (%)</i>	<i>Zacualtipán de Ángeles (%)</i>
Uso Común	91.0	79.0	99.0
Asentamiento humano	8.5	20.0	0.5
Reserva de crecimiento	0.5	10.0	0.5

Clima de los municipios estudiados

El municipio de Atotonilco el Grande presenta un clima templado semi-frío de 15 °C con temperaturas promedio y el mes más frío entre 3 °C y 18 °C, las precipitaciones del mes mas seco es mayor a 55 mm (García, 1973; INEGI, 2000a).

Tulancingo presenta un clima templado-húmedo en el sur-este, y semiseco-templado en el centro y norte del municipio. Los cambios estacionales de la temperatura son de poca consideración; las temperaturas promedio en la parte sur es de 10 °C la media anual, con extremos de 14 °C y 5 °C; enero es el mes más frío y junio el más caliente. En la parte del norte, los extremos llegan de 16 °C y 6 °C, respectivamente, mientras la temperatura media anual es de 12 °C. Las heladas se presentan de octubre a marzo en la parte baja, y suelen prolongarse hasta abril. Los vientos dominantes son del norte-noroeste durante la estación seca de invierno y del noreste en la estación cálida-húmeda (Can, 2005; García, 1973; INEGI, 2000a).

El clima de Zacualtipán de Ángeles es templado húmedo, con una temperatura media anual de 13.5 °C (Aguirre, 2007; García, 1973; INEGI, 2000a).

Precipitación de los municipios estudiados

Los tres municipios estudiados presentan una precipitación de gran variabilidad, a pesar de que Tulancingo de Bravo se localiza en la parte alta de la cuenca, sus condiciones fisiográficas y climáticas generan una precipitación de 400-1000 mm anuales, la cual es menor a la de los otros dos municipios (Atotonilco el Grande con 700 mm y Zacualtipán de Ángeles con 2047 mm).

1.4 Descripción de las condiciones sociodemográficos de los municipios estudiados

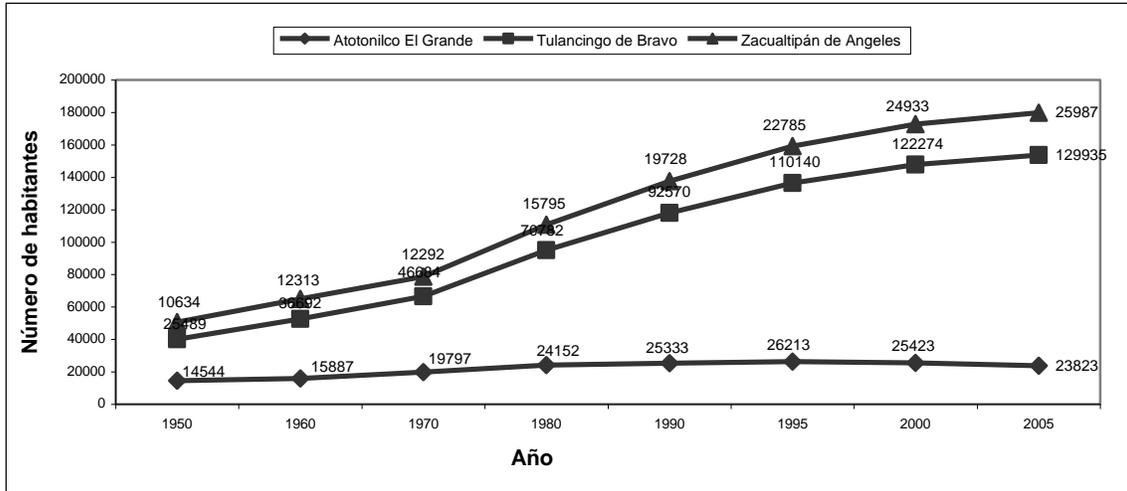
Los aspectos sociodemográficos de toda población definen la dirección y magnitud del desarrollo, y en ello influyen algunas variables tales como el número de habitantes, empleo y la economía de cada lugar. Si estas variables no se planifican

adecuadamente pueden llegar a generar problemas ambientales como la pérdida de biodiversidad, erosión, cambios de uso del suelo, así como problemas sociales, tales como migración de la población generando a su vez el abandono de las tierras, problemas de salud y la falta de servicios básicos.

1.4.1 Población

La población de los tres municipios estudiados ha presentado un crecimiento gradual, entre el año de 1950 a 2005, el número de personas se incrementó de 50,667 a 181,75 habitantes (INEGI, 2008b) (Figura 1.5).

El poco crecimiento de la población hasta antes de 1970 en los tres municipios estudiados, quizás se deba a la migración de la población (Comisión de población y migración, 2008). Sin embargo, después de 1970 se observa (Figura 1.5) que las curvas de crecimiento poblacional crecen aceleradamente, siendo para Tulancingo de Bravo mucho mayor que los municipios de Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles. Lo anterior posiblemente se deba a las oportunidades y empleos que brinda esta cabecera municipal en comparación con los demás municipios de la Cuenca de Metztitlán (INEGI, 2008c y 2009). Cabe mencionar que Tulancingo de Bravo se encuentra dentro de los tres municipios principales de crecimiento poblacional en la Entidad, considerando que Pachuca de Soto ocupa el primer lugar con una población de 275,578 habitantes, el segundo lugar es para el municipio de Tulancingo de Bravo con una población de 129,935 y Huejutla de Reyes con 115,786 habitantes (INEGI, 2009), de manera que el municipio de Tulancingo de Bravo no solo es importante a nivel de la Cuenca de Metztitlán por su crecimiento poblacional, si no también en la Entidad.



Fuente: INEGI (2000b, 2005, 2008a, 2008c y 2009).

FIGURA 1.5. TENDENCIA DE LA POBLACIÓN DE LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS DE 1950 A 2005.

A partir de los años setenta, los avances tecnológicos en materia del control natal, así como diferentes procesos sociales, económicos, políticos y culturales lograron revertir la tendencia del crecimiento poblacional en las últimas décadas de modo que en el primer lustro del siglo XXI, la tasa de crecimiento medio del país llegó a ser solo de 1.02% anual (INEGI 2008a) manifestándose la misma tendencia en las diferentes entidades, así como en el estado de Hidalgo.

El crecimiento poblacional de Hidalgo presenta una etapa de transición demográfica avanzada debido a que no ha dejado de crecer a nivel poblacional, pero la velocidad con la que lo hace se ha reducido significativamente a 0.85%. En tanto que en los tres municipios estudiados la dinámica demográfica es muy diferente (Cuadro 1.4). Atotonilco el Grande presenta una tasa de crecimiento menor e incluso negativa (i.e., -1.14%) durante el periodo de 1995 a 2005 a consecuencia de la emigración (INEGI, 2008c), en comparación con los otros dos municipios bajo estudio. Lo anterior, significa que el proceso de migración es un componente fundamental en la dinámica demográfica de Atotonilco.

Cuadro 1.4. Tasa de crecimiento media anual de los municipios estudiados y de Hidalgo.

<i>Municipio/ Estado</i>	<i>Tasa de crecimiento (Año)</i>						
	<i>1950-1960</i>	<i>1960-1970</i>	<i>1970-1980</i>	<i>1980-1990</i>	<i>1990-1995</i>	<i>1995-2000</i>	<i>2000-2005</i>
Atotonilco el Grande	0.90	2.30	1.90	0.50	0.61	-0.71	-1.14
Tulancingo de Bravo	3.70	2.50	4.10	2.80	3.12	2.47	1.08
Zacualtipán de Ángeles	1.50	-0.02	2.50	2.30	2.15	2.13	0.73
Hidalgo	1.60	1.90	2.50	2.10	2.00	1.33	0.85

INEGI (2005 y 2008c).

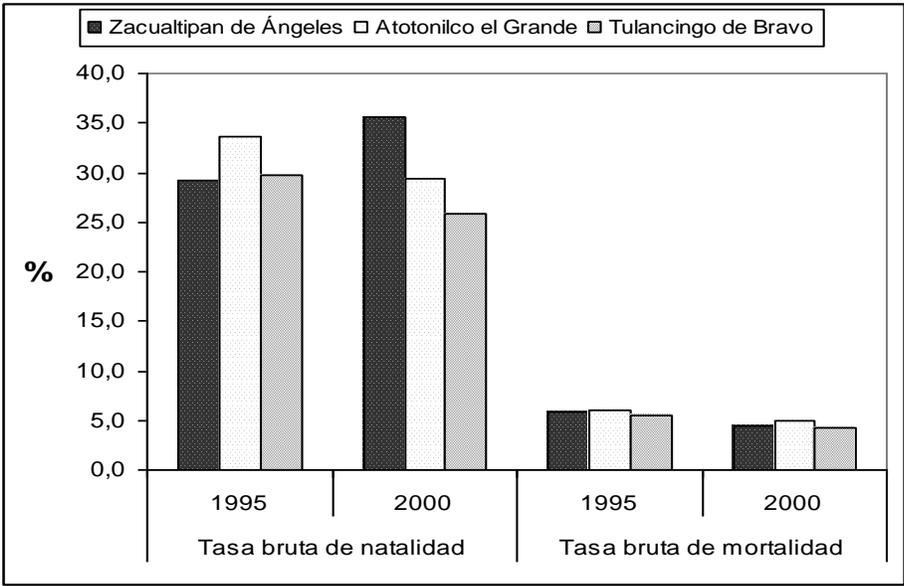
Sin embargo, Tulancingo de Bravo es el municipio de mayor crecimiento y tiene una tasa mayor al 1.0%, debido probablemente a que posee los mejores servicios y programas de salud en comparación con los otros dos municipios. Mientras que para Zacualtipán de Ángeles se tiene una tasa de crecimiento media anual de 0.73%.

La distribución de la población de los municipios estudiados se concentra principalmente en las cabeceras municipales, es decir en la ciudad de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, por lo que las otras poblaciones de los municipios presentan volúmenes de poblaciones bajos (INEGI 2008c). Aunque en relación a INEGI (2005), el incremento de la población de los municipios estudiados ocurre en algunas localidades específicas. Por ejemplo, para Atotonilco el Grande, los poblados con mayor desarrollo son: Atotonilco, Los Sabinos, Santa María Amajac (La Piaña), La Estancia, Tiltepec, La Puebla, San Martín, Apipilhuasco, Cerro Colorado y La Cruz (Barrio de la Cruz).

En el municipio de Tulancingo de Bravo, el crecimiento se distribuye en las localidades de: Tulancingo, Santa Ana Hueytlalpan, Jaltepec, Javier Rojo Gómez, Santa María Asunción, Parque Urbano Napateco, el Fraccionamiento del Magisterio Tulancinguense, La Lagunilla, Tepalzingo y Ahuehuetitla (INEGI, 2005).

Finalmente, en el municipio de Zacualtipán de Ángeles, el incremento de la población se concentra en las localidades de Zacualtipán, Coatlila, Tlahuelompa (San Francisco Tlahuelompa), Tizapán, La Mojonera, Atopixco, Jalapa, San Bernardo, Tzincoatlán y Olonteco (INEGI, 2005).

Por otro lado, la tasa de natalidad permite conocer el número de nacimientos con respecto a un periodo determinado. Este proceso influye en la calidad de servicios de salud existente en cada población. En 1995, Atotonilco el Grande presentó una tasa de natalidad alta comparada con los otros dos municipios estudiados, sin embargo en el 2000 la mayor tasa de natalidad se presentó en el municipio de Zacualtipán de Ángeles (Figura 1.6). Mientras que en los otros dos municipios estudiados disminuyeron en los años comparados (1995, 2000).



Fuente: INEGI (2000b).

FIGURA 1.6. TASA DE NATALIDAD Y MORTALIDAD EN LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS.

Al comparar la tasa de mortalidad en los tres municipios referidos entre 1995 y 2000 se encuentra que ésta ha disminuido para el último año. Además, al comparar la tasa de natalidad con la de mortalidad entre 1995 y 2000 para los tres municipios bajo estudio, se observa (Figura 1.7) que la primera supera con mucho a la segunda lo

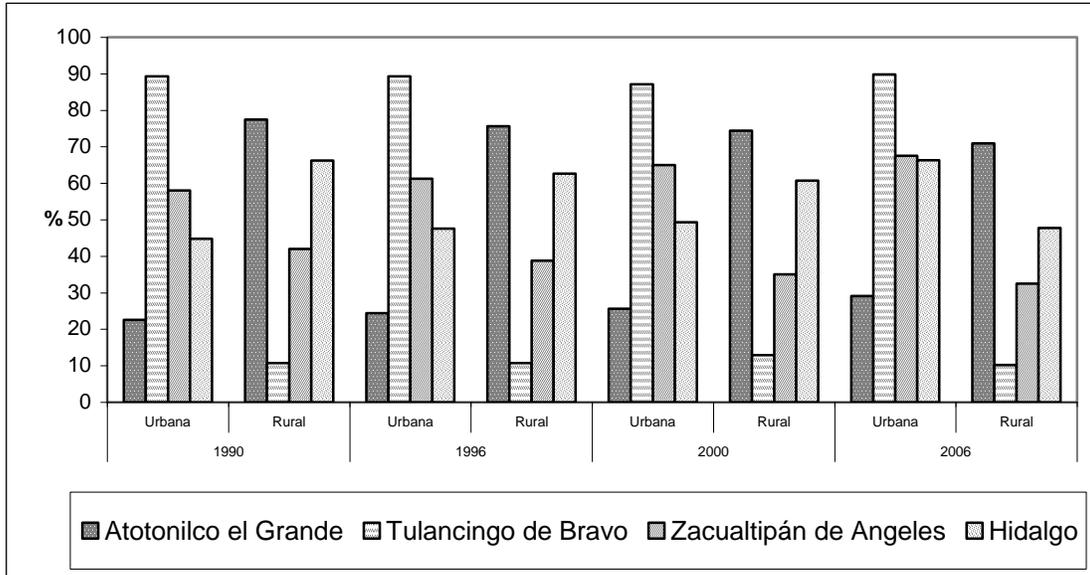
que significa que, sin incluir el proceso de migración, la población continua incrementando aunque muy lentamente (INEGI, 2008c y 2009).

INEGI (2008b) bajo criterios censales considera como áreas urbanas aquellas comunidades que tienen una población de más de 2,500 habitantes, o bien que sean cabeceras municipales aunque no cumplan con este requisito (Villalvazo *et al.*, 2002). De manera que los municipios bajo estudio se clasifican en localidades urbanas, debido a que presentan una población mayor de 2,500 habitantes y son cabeceras municipales.

En el año 2000, el 50% de los habitantes de los municipios de Atotonilco el Grande, Tulancingo de Bravo y Zacualtipán de Ángeles vivía en localidades menores de 2,500 habitantes; es decir en localidades rurales, mientras que para el 2005 las poblaciones han incrementado por lo que se han convertido en poblaciones urbanas (INEGI, 2008b).

Con base en esta información y a INEGI (2005 y 2008c), la población de Atotonilco el Grande asciende a 23,823 habitantes. De ellos, el 70% vive en localidades rurales. Mientras que el municipio de Tulancingo de Bravo presenta el mayor crecimiento poblacional en la cuenca. Éste cuenta con 129,935 habitantes de los cuales 89% de la población habita en zonas urbanas.

Por su parte, Zacualtipán de Ángeles cuenta con 25,987 habitantes, 68% de ellos vive en áreas urbanas. Este municipio mantiene una tendencia de incremento similar al de la entidad, ya que en Hidalgo, 66% de su población habita en localidades urbanas en relación a los años consultados (INEGI, 2008c) (Figura 1.7).



Fuente: INEGI (2008c).

FIGURA 1.7. POBLACIÓN RURAL Y URBANA EN LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS Y DEL ESTADO DE HIDALGO.

1.4.2 Educación

La educación es un proceso de vida que involucra no solamente conocimiento y habilidades, también es parte del desarrollo de una población mediante el cual una persona desarrolla sus capacidades para enfrentarse positivamente a un medio social determinado o integrarse a él (INEGI, 2008a; INEGI, 2008c).

En 2005, del total de la población alfabeta de 15 y más años en el municipio de Atotonilco el Grande fue de 84.1%, y presentó un incremento relativo de las personas que saber leer y escribir comparado con el año de 1990, 1995, 2000 y 2005. Respecto al municipio de Tulancingo de Bravo, el porcentaje de población alfabeta fue mayor comparado con los municipios de Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles. Aunque éste último presentó un porcentaje mayor al del municipio de Atotonilco el Grande no superó a Tulancingo de Bravo. A mayor población urbana en un municipio, mayor es la probabilidad de encontrar un grado de educación promedio. Este comportamiento se encontró en los municipios estudiados.

En cuanto al porcentaje de alfabetización de la población por sexo, en los tres municipios se observó que el hombre en los cuatro años presentó un porcentaje mayor de alfabetización, y al comparar los tres municipios se percibe que el municipio con menor porcentaje de alfabetización en hombres y mujeres es Atotonilco el Grande, también se observó que presenta una tendencia similar en porcentaje de alfabetización que la Entidad (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5. Porcentaje de la población alfabetizada de 15 y más años por sexo de los municipios estudiados y del estado de Hidalgo.

<i>Municipio / Entidad</i>	1990		1995		2000		2005	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Atotonilco el Grande	85.5	73.1	88.0	77.8	87.9	80.0	87.4	81.5
Tulancingo de Bravo	91.5	84.8	92.2	87.6	93.0	88.6	94.0	91.0
Zacuatlipán de Ángeles	86.0	79.0	86.4	80.3	89.2	83.6	89.8	86.4
Hidalgo	84.1	74.8	86.8	79.5	88.4	82.1	89.7	85.0

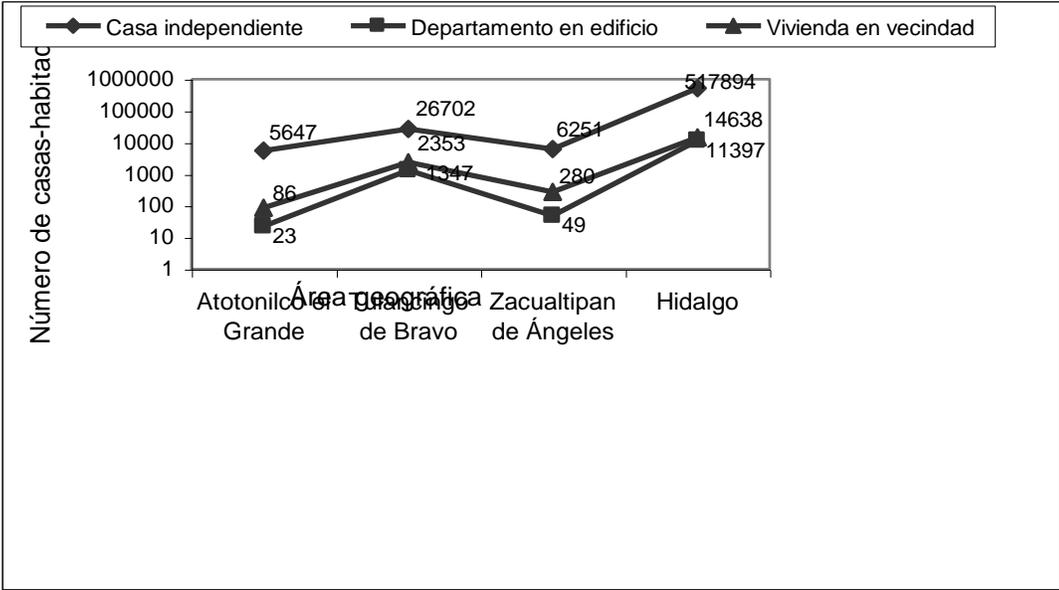
Fuente: INEGI (2008b).

1.4.3 Vivienda

La población agrupada en unidades de convivencia u hogares demanda viviendas para satisfacer sus unidades básicas de alojamiento. El municipio de Atotonilco el Grande cuenta con 5,756 viviendas, de las cuales 5,647 son casas independientes, particulares y construidas con concreto, con 4 a 6 habitantes cada una.

En tanto, el municipio de Tulancingo de Bravo, del total de 30,402 viviendas, 26,702 son casas particulares e independientes, 1,347 viviendas en departamentos de edificios y 2,353 son viviendas en vecindades. Las viviendas albergan un promedio de 4 a 6 habitantes por casa habitación en todo el municipio. La infraestructura predominante de las viviendas es de concreto, las cuales se encuentran principalmente en localidades con una población de 15,000 habitantes (INEGI, 2008a) y es similar al de la entidad.

Finalmente, el municipio de Zacualtipán de Ángeles cuenta con 6,580 viviendas, de las cuales 6,251 son casas independientes, particulares y construidas con concreto y 280 viviendas en vecindades con un promedio de 4 personas por casa (INEGI, 2005) (Figura 1.8).



Fuente: INEGI (2005).

FIGURA 1.8. CASAS HABITACIÓN EN LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS Y EN EL ESTADO DE HIDALGO.

1.4.4 Empleo

La población económicamente activa (PEA) de una localidad es el conjunto de personas en edad de trabajar para la producción de bienes y servicios, y que se encuentren laborando o en busca de un trabajo. En México, la edad de laborar es a los 18 años, aunque INEGI (2005) reporta como edad de incorporación a la fuerza de trabajo laboral a los 12 años. La PEA permite conocer la mano de obra activa con que cuenta cada localidad en un momento específico.

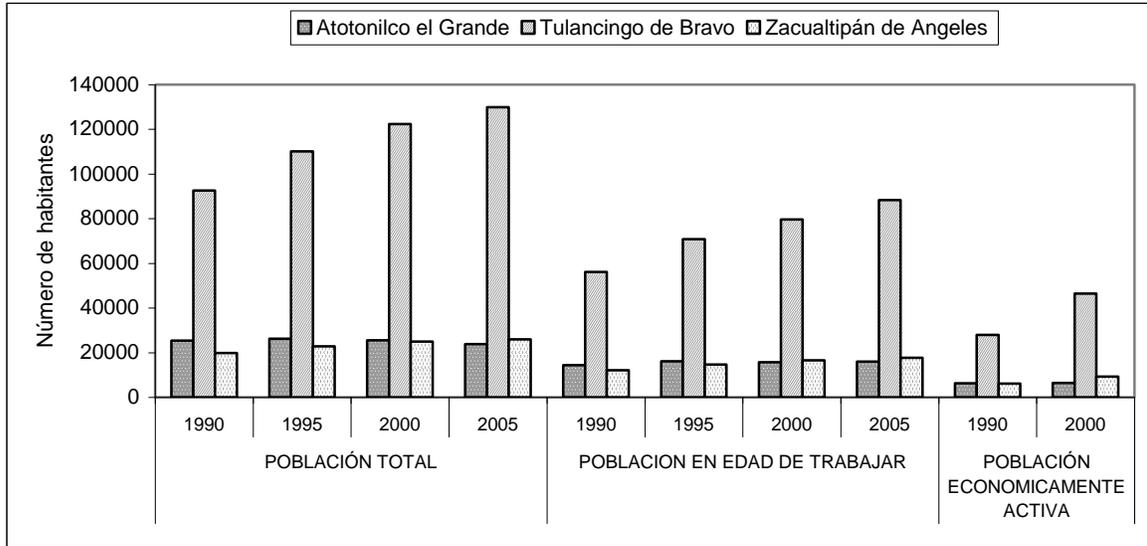
En el año 1990, la población total en edad de trabajar en los tres municipios fue de 14,338 habitantes para Atotonilco el Grande, 56,097 en Tulancingo de Bravo y 12,093 para Zacualtipán de Ángeles. De éstos habitantes, el 44% de Atotonilco el

Grande forman parte de la PEA, mientras que el 50% es para Tulancingo de Bravo y 50% para Zacualtipán de Ángeles. De igual manera para el 2000, el total de la población en edad de trabajar fue de 15,737 para Atotonilco el Grande, 79,600 para Tulancingo de Bravo y 16,456 Zacualtipán de Ángeles, lo que representó el 40%, 58% y 56%, respectivamente para el año 2005.

Entre 1990 y 2000 la PEA en Atotonilco el Grande disminuyó 4 puntos porcentuales debido a que del total de habitantes (1,399 personas) en edad de trabajar solo 30 consiguieron trabajo en ese periodo de tiempo, por lo que 1,396 habitantes perdieron su empleo o dejaron de trabajar. Mientras que Tulancingo de Bravo aumento 8 puntos porcentuales, lo que representa que 18,616 habitantes cuentan con trabajo y 4,887 no, o están en busca de éste. De los 4,363 habitantes en edad de trabajar en Zacualtipán de Ángeles, solo 3,107 habitantes consiguieron trabajo generando 6% de incremento en la PEA y 1,256 no tienen trabajo. El incremento de la PEA se da con respecto al incremento de la población en las tres ciudades (Figura 1.9).

Para el año 2005 se estima un porcentaje similar al de la PEA para las tres ciudades, es decir un incremento mínimo o nulo del 4% para Atotonilco el Grande, 8% para Tulancingo de Bravo y 6% para Zacualtipán de Ángeles. Sin embargo, para Tulancingo de Bravo se da un crecimiento sustancial de hasta 10 puntos porcentuales.

Se observa (Figura 1.9) que más de la mitad de la población en edad de trabajar no trabaja y ésta se dedica al hogar, estudia, es discapacitado o en su defecto está en busca de empleo (INEGI, 2004).



Fuente: INEGI (2004, 2005).

FIGURA 1.9. POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA DE LOS MUNICIPIOS ESTUDIADOS Y A NIVEL DEL ESTADO DE HIDALGO.

Se estima que para el 2005 el porcentaje de la PEA será similar al tenido entre 1990 y 2000 en las tres ciudades de estudio.

Finalmente en relación a la actividad económica de la población, la principal actividad en Tulancingo de Bravo es el sector secundario con 80%, la PEA trabaja especialmente en industrias manufactureras y algunos comercios. Sin embargo, en Atotonilco el Grande, el 65% del total de los habitantes trabaja en el sector primario, y un 35% de ellos se dedican al sector secundario principalmente como artesanos y obreros. En tanto que los habitantes del municipio de Zacualtipán de Ángeles, el 65% de la PEA se dedica al sector secundario como artesanos y obreros, y un 35% a las actividades agropecuarias (INEGI, 2004).

1.4.5 Inversión pública

El municipio es el primer organismo de ejecución e innovación de los programas de protección, cuidado y educación de la población, dicha responsabilidad del desarrollo local es a partir de programas integrales de salud, educación, empleo y seguridad. A pesar de la heterogeneidad de los municipios, los proyectos deben tener incidencia en diferentes sectores que tengan respuesta a diversas necesidades y que cuenten

con proyectos de infraestructura básicas (por ej., agua potable, electrificación, caminos, infraestructura de salud y educación), asistencia técnica en temas de gestión y administración municipal, planificación participativa local, entre otros. Todo ello permitirá el desarrollo integral de las poblaciones a través de los programas de inversión pública.

En el municipio de Atotonilco el Grande, aparte de los programas de desarrollo institucional, se invierte en comunicación, transporte y en fomento agrícola. En el municipio de Tulancingo de Bravo, la inversión del recurso público se ejecuta principalmente en programas de desarrollo institucional, infraestructura de seguridad y urbanización, siendo la educación el séptimo programa de inversión, mientras que el sector salud es el último en ser apoyado con recursos. Finalmente, en el municipio de Zacualtípán de Ángeles, el ingreso captado por el gobierno es invertido en programas de comunicación, transporte y desarrollo institucional (INEGI, 2005). En los tres municipios estudiados, la inversión de recursos públicos en la educación y salud no son programas de importancia dentro de los gobiernos municipales, siendo éste un factor decisivo en la obtención de un nivel de vida de calidad.

1.4.6 Actividades económicas

Agricultura

Las actividades agrícolas que se realizan en los tres municipios son muy variadas. En Atotonilco el Grande los principales cultivos son maíz en grano, avena forrajera, alfalfa verde y cebadas forrajeras referidas al total de toneladas de producción generada (Cuadro 1.6), aunque también se producen cultivos como aguacate, durazno, maguey pulquero, tomate verde, entre otros.

El principal cultivo agrícola en Tulancingo de Bravo es la producción de pastizales, pero también sobresale la producción de alfalfa, avena forrajera, maíz forrajero, maíz en grano, cebada en grano y tomate verde, entre otros cultivos como sorgo forrajero, jitomate, calabacita y trigo en grano aunque en menor producción (Cuadro 1.6).

El cultivo agrícola en el municipio de Zacualtipán de Ángeles son los forrajes (avena forrajera y maíz forrajero), al igual que el municipio de Tulancingo de Bravo (diferiendo en toneladas de producción), sin embargo también se tienen otros cultivos como caña de azúcar y cebada forrajera en verde (Cuadro 1.6).

En cuanto a la superficie empleada para los cultivos, el 73% del municipio de Atotonilco el Grande es de temporal, principalmente para los cultivos cíclicos de maíz en grano y los cultivos perennes como el maguey pulquero y los pastizales, mientras que el 26% de la superficie de riego es destinada también para maíz de grano y alfalfa (Cuadro 1.6).

El 58% de la superficie agrícola del municipio de Tulancingo de Bravo es de temporal dedicada a los cultivos cíclicos como la cebada y los cultivos perennes de pastizales y la alfalfa, mientras que la superficie de riego es dedicada para los cultivos cíclicos de maíz en grano, maíz forrajero y avena forrajera principalmente. La superficie agrícola en Zacualtipán de Ángeles es dedicada principalmente a cultivos de temporal (Cuadro 1.6).

Cuadro 1.6. Producción agrícola de riego y temporal de los municipios estudiados (ton).

<i>Cultivo</i>	<i>Atotonilco el Grande</i>	<i>Tulancingo de Bravo</i>	<i>Zacualtipán de Ángeles</i>
Aguacate	360.0	0.0	0.0
Alfalfa verde	1,575.0	64,672.0	0.0
Alstroemeria (Gruesa)	120.0	0.0	0.0
Arvejón	0.0	0.0	8.8
Avena forrajera	6,370.0	21,110.0	144.0
Cacahuete	30.0	0.0	9.0
Café cereza	0.0	0.0	74.7
Calabacita	0.0	108.0	0.0
Caña de azúcar otro uso	0.0	0.0	224.0
Cebada forrajera en verde	1,180.0	0.0	96.0
Cebada grano	30.0	4,882.5	0.0
Chicharo	0.0	49.5	0.0
Cilantro		24.0	0.0
Chile verde	30.0	0.0	12.9
Ciruela	0.0	0.0	28.0
Durazno	232.0	0.0	0.0
Frijol	76.2	0.0	53.1
Haba verde	15.0	0.0	0.0
Limón	0.0	0.0	40.0
Maguey pulquero (miles de litros)	810.0	0.0	85.0
Maíz forrajero	0.0	12,958.5	0.0
Maíz grano	13,352.6	7,026.3	721.0
Manzana	30.0	0.0	100.0
Naranja	0.0	0.0	60.0
Nopalitos	5.0	0.0	0.0
Nuez	204.0	0.0	0.0
Pastos	425.0	188,866.0	8,472.0
Pera	0.0	0.0	25.0
Sorgo forrajero verde	72.0	378.0	0.0
Tomate rojo (jitomate)	0.0	287.0	0.0
Tomate verde	180.0	1,020.0	0.0
Trigo grano	0.0	62.4	0.0
Tuna	45.0	0.0	0.0
Zarzamora	10.5	0.0	0.0

Fuente: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2006).

Ganadería

En los tres municipios se produce ganado bovino, porcino, ovino, caprino y aves, en volúmenes muy variados para cada uno. Por ejemplo, en Atotonilco las principales especies son: Ganado bovino con 1,031 y de aves con 1,720 toneladas. La producción principal en Tulancingo de Bravo es el ganado bovino con 2,087 cabezas

y también para Zacualtipán de Ángeles, aunque su volumen de producción es menor (229 toneladas) (Cuadro 1.7).

Respecto al volumen de producción de carne, Atotonilco el Grande produce carne en canal de ave con 1,237 toneladas, mientras que Tulancingo de Bravo produce carne de ovino en canal con 1,085 toneladas. Zacualtipán de Ángeles también produce carne de bovino en canal, aunque el volumen de producción es menor (216 toneladas) en comparación con los otros dos municipios.

Cuadro 1.7. Producción ganadera de los municipios estudiados (ton).

<i>Producto / Especie</i>	<i>Atotonilco el Grande</i>	<i>Tulancingo de Bravo</i>	<i>Zacualtipán de Ángeles</i>
Ganado en pie de bovino	1,031	2087	229
Ganado en pie de porcino	342	426	43
Ganado en pie de ovino	248	131	17
Ganado en pie de caprino	47	13	13
Ganado en pie ave	1,720	334	49
Ganado en pie de guajolote	19	9	9
Carne de canal de bovino	543	1085	125
Carne de canal de porcino	244	307	30
Carne de canal de ovino	126	67	8
Carne de canal de caprino	23	6	6
Carne de canal de ave	1,237	226	33
Carne de canal de guajolote	13	6	6
Leche de bovino	4,694	13438	216
Huevo para plato	134	1450	66
Miel	31	0	0
Cera en greña	3	0	0
Lana sucia	36	13	2

Fuente: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2006).

La superficie dedicada a la ganadería es muy variable en los tres municipios estudiados (Cuadro 1.8), principalmente se dedica a praderas, agostaderos y matorrales. Se observa que Zacualtipán de Ángeles es el municipio con menor superficie destinada a la ganadería (2,743 ha), quizás debido a que la tenencia de la tierra es principalmente comunal y al tipo de uso del suelo.

Cuadro 1.8. Superficie destinada a la ganadería en los municipios estudiados (ha).

<i>Tipo de uso</i>	<i>Municipio</i>		
	<i>Tulancingo de Bravo</i>	<i>Atotonilco el Grande</i>	<i>Zacualtipán de Angeles</i>
Praderas	0.0	17.0	1,865.0
Agostadero	7,291.0	5,956.0	878.0
Matorrales	0.0	24,092.0	0.0
Total	7,291.0	30,065.0	2,743.0

Fuente: INEGI (2001).

Silvicultura

Respecto a la actividad silvícola, el municipio de Tulancingo de Bravo cuenta con especies de coníferas incluyendo el pino y oyamel, con un volumen de producción de 2,344 m³ por año de madera en rollo. El volumen producido en el municipio de Zacualtipán de Ángeles es de 10,390 m³ de madera en rollo, principalmente provenientes de especies de coníferas tales como pino, y de especies latifoliadas como el encino y liquidámbar. Sin embargo, el municipio de Atotonilco el Grande no cuenta con registros de volumen de producción maderable.

Industria

Respecto a las unidades manufactureras de los municipios estudiados (Cuadro 1.9) se observa que Tulancingo de Bravo cuenta con mayor número de unidades económicas manufactureras con 566 unidades, posteriormente le siguen Zacualtipán de Ángeles con 95 unidades y Atotonilco el Grande con 62 unidades manufactureras. Lo anterior, debido probablemente a las actividades económicas que se desarrollan en cada municipio, por ejemplo en Tulancingo de Bravo las actividades económicas son de tipo secundario, al igual que en Zacualtipán de Ángeles, mientras que en Atotonilco el Grande estas actividades económicas son primarias principalmente.

Cuadro 1.9. Información de las actividades económicas manufactureras de los municipios estudiados.

<i>Municipio</i>	<i>Unidades económicas 2004</i>	<i>Personal ocupado total 2004</i>	<i>Producción bruta total 2004</i>	<i>Consumo intermedio 2004</i>	<i>Valor agregado censal bruto 2004</i>
Atotonilco el Grande	62	206	16,988	10,300	6,688
Tulancingo de Bravo	566	4,399	1,355,423	829,081	526,342
Zacualtipán de Ángeles	95	1,284	228,392	147,361	81,031

Fuente: SIMBAD (2004).

Del total de las unidades manufactureras, la confección y fabricación de prendas de vestir, la elaboración de productos de panadería y tortilla, la industria alimentaria y manufacturera, son las más importantes en los tres municipios. En relación a la confección de prendas de vestir, el 81% se realiza en Tulancingo y el 19% en Zacualtipán de Ángeles. Con respecto a la fabricación de prendas de vestir Tulancingo de Bravo realiza el 80% y, Zacualtipán de Ángeles realiza el 20%. En la elaboración de productos de panadería y tortilla, el 86% se realiza en Tulancingo de Bravo y el 14% en Atotonilco el Grande. La elaboración de productos lácteos el 11% se elabora en Atotonilco el Grande y el 89% en Tulancingo de Bravo. Dentro de la industria alimentaria, el 11% de las unidades se encuentran en Atotonilco el Grande, 75% en Tulancingo de Bravo y el 14% restante en el municipio de Zacualtipán de Ángeles (Cuadro 1.10).

Cuadro 1.10. Población empleada en las diferentes industrias.

<i>Unidad Manufacturera</i>	<i>Atotonilco el Grande</i>	<i>Tulancingo de Bravo</i>	<i>Zacualtipán de Ángeles</i>
Acabado y recubrimiento de textiles	0	15	0
Confección de alfombras, blancos y similares	0	51	0
Confección de otros productos textiles, excepto prendas de vestir	36	87	73
Confección de prendas de vestir	1	427	1074
Confección de productos textiles, excepto prendas de vestir	36	138	73
Elaboración de azúcar, chocolates, dulces y similares	0	32	0
Elaboración de productos de panadería y tortillas	102	525	83
Elaboración de productos lácteos	7	161	2
Fabricación de equipo de transporte	0	19	0
Fabricación de insumos textiles	0	1783	0
Fabricación de maquinaria y equipo	0	70	0
Fabricación de muebles y productos relacionados	3	97	1
Fabricación de prendas de vestir	1	629	1087
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	0	114	2
Fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos, excepto prendas de vestir	0	1	1
Fabricación de productos metálicos	27	165	23
Fabricación de telas	0	1264	0
Impresión e industrias conexas	6	80	4
Industria alimentaria	109	809	85
Industria de la madera	18	82	7
Industria de las bebidas	4	293	0
Industria de las bebidas y del tabaco	4	293	0
Industria del plástico y del hule	0	47	0
Industria química	0	7	0
Industrias manufactureras	206	4399	1284
Matanza, empaclado y procesamiento de carne de ganado y aves	0	74	0
Molienda de granos y de semillas oleaginosas	0	3	0
Preparación e hilado de fibras textiles y fabricación de hilos	0	504	0
Preparación y envasado de pescados y mariscos	0	6	0
Tejido de prendas de vestir de punto	0	199	13
Otras industrias alimentarias	0	8	0

Fuente: INEGI (2004).

1.5 Antecedentes históricos del área bajo estudio

El territorio del estado de Hidalgo perteneció, desde el siglo XVI, a la provincia de México, la cual en 1786 se convirtió en la intendencia del mismo nombre, y a partir de la constitución de 1824 formó parte del Estado de México. Por 37 años los municipios de lo que hoy conforman al estado de Hidalgo tuvieron como capital estatal a San Agustín de la Cuevas o Tlalpan y posteriormente a Toluca (Ballesteros,

1995). En busca de mayor bienestar, política, social y económica, a partir de la séptima década del siglo, los habitantes buscaron su autonomía y las circunstancias históricas favorecieron la iniciativa. Las intenciones separatistas se debieron principalmente al abandono que sufrían las poblaciones del norte del Estado por parte de la administración gubernamental de Toluca, por lo que deseaban elegir libremente a sus autoridades tanto políticas y judiciales, y pretendían que los impuestos que pagaba cada localidad se emplearan en su beneficio. El 16 de enero de 1869 se decretó la erección del estado de Hidalgo, conformada por once distritos: Actopan, Huascazaloja, Huejutla, Huichapan, Pachuca, Tula, Tulancingo, Ixmiquilpan y Zimapán (Ballesteros, 1995).

Conforme a datos de 1869, el estado de Hidalgo tenía 404,207 habitantes distribuidos en 403 poblaciones, 176 haciendas y 1008 rancherías, con una densidad de población de 18.4 hab/km²; sin embargo, en 1990 la densidad de población aumentó a 90.8 hab/km² (Ballesteros, 1995).

En 1869 las ciudades de mayor importancia económica en el estado de Hidalgo eran Pachuca y Tulancingo, ya que el valor catastral de estas dos ciudades representaba el 59% de las propiedades urbanas del Estado (Ballesteros, 1995). De tal manera que Tulancingo de Bravo no solo es una de las ciudades importantes dentro de la cuenca, si no también del estado. Lo anterior motivó para la realización de este estudio, además de incluir a los municipios de Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles.

Atotonilco el Grande proviene de la lengua Náhuatl que significa “En las aguas termales”. Su nombre se debe gracias a sus baños termales con que cuenta el municipio. Para diferenciarse de otros lugares que tenían el mismo nombre, en la antigüedad se le conoció como “Huei-Atotonilco”, que quiere decir Atotonilco el Grande, “Huei”, en lengua Náhuatl, proviene de “Huehuetl”, que significa grande o viejo (Enciclopedia de los municipios del Estado de Hidalgo, 2005). Atotonilco fue uno de los principales pueblos en 1746, fecha en la que era poblado por 265 familias

de indígenas, que eran administrados por un cura religioso de San Agustín, del convento de este pueblo; vivían también algunas familias de españoles y algunos mestizos (Ballesteros, 1993; Enciclopedia de los municipios del estado de Hidalgo, 2005). Posteriormente el municipio se ha configurado a través del tiempo conformado en 48 comunidades que incluyen barrios y pequeños poblados (Ballesteros, 1993).

Tulancingo de Bravo se deriva de las raíces Náhoas "Tule o Tular" y Tzintle, que significa "En el tular o detrás del tule". De acuerdo con su jeroglífico, representa un manojo de tules ocultando a un indio. Fue fundado por los Toltecas, nombrada "Tolancingo"; y en 1525 fue sometida a dominio hispano (Enciclopedia de los municipios del Estado de Hidalgo, 2005).

Después de Pachuca, Tulancingo de Bravo es la segunda ciudad en importancia en el Estado que ha desarrollado un importante comercio y es origen del grupo más antiguo de la burguesía Hidalguense, suscitado por la mediana industria textil y por los rancheros adinerados de la región. Tradicionalmente, desde el punto de vista político Tulancingo ha competido con Pachuca. Es una región donde es más visible la religiosidad y el peso de la iglesia como institución (Gutiérrez, 1990).

El Municipio de Zacualtipán de Ángeles deriva su nombre de la raíz Tzacualtipán que etimológicamente significa, "Lugar de escondites" o "Lugar de montículos o pirámides" y existen varias traducciones sobre su significado incluyendo: "donde se hacen paredes" o "donde se construye bien". La fundación de la población de Zacualtipán ocurrió en el siglo XVIII; el 26 de abril de año de 1861 se le otorgó la categoría de Municipio a Zacualtipán y el 8 de marzo del año de 1943 se le otorgó el título de Ciudad a la cabecera municipal (Gutiérrez, 1990).

1.6 Literatura citada

- Aguirre S. C. A., 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados en *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 98 p.
- Ballesteros G. V. M. 1993. Monografía del municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo. Instituto Hidalguense de la cultura. 35 p.
- Ballesteros G. V. M. 1995. La creación del Estado de Hidalgo. Consejo Estatal para la Cultura y las Artes del Estado de Hidalgo. Centro del Investigaciones. Pachuca, México. 32 p.
- Bocco G., M. Mendoza y O. R. Maser. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Núm. 44. 21 p.
- Can C. A. 2005. Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del cauce del Río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 198 p.
- Comisión de población y migración. 2008. Comisión permanente de población y migración. Congreso de Estado de Hidalgo. Disponible en: <http://www.congreso-hidalgo.gob.mx/interface2008/Informes%20Diputados/Comision%20de%20Poblacion%20y%20Migracion%20.pdf>. Consultado: septiembre 2008.
- Enciclopedia de los Municipios del Estado de Hidalgo. 2005. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Gobierno del Estado de Hidalgo. Estadísticas de Natalidad, de Nupcialidad y de Mortalidad. 2003.
- García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Autónoma Nacional de México. México. 246 p.
- Gutiérrez I. E. 1990. Hidalgo: Sociedad, economía, política y cultura. UNAM, Centro de Investigaciones interdisciplinarias en Humanidades. México DF. 117 p.
- INEGI. 2000a Conjunto de datos vectorial F14D61, F14D62, F14D71, F14D72, F14D82 Y F14D83 de la Carta Topográfica Escala 1:50,000. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2000b. Principales resultados por localidad del XII censo general de población y vivienda 2000. (Versión Disco Compacto). INEGI. México.

- INEGI. 2001 Resultados del VIII Censo Ejidal. Disco Compacto. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2004 Censos económicos. Disco Compacto. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2005. Censo general de Población y Vivienda, 2005. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Hidalgo. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. Consultado: diciembre 2008.
- INEGI. 2006. Mapa de regiones hidrológicas. INEGI. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/hgo/rh.cfm?c=444&e=13>.
- INEGI. 2008a. México y sus municipios. INEGI. Aguascalientes, México. 373 p.
- INEGI. 2008b. Perfil sociodemográfico de los Estados Unidos Mexicanos. INEGI. Aguascalientes, México. 108 p.
- INEGI. 2008c. Perfil sociodemográfico de Hidalgo. INEGI. Aguascalientes, México. 281 p.
- INEGI. 2009. Perspectiva Estadística: Hidalgo. INEGI. Aguascalientes, México. 87 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2000. IPCC special report, Land use, Land-Use Change and Forestry. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. 30 p.
- Lambin E., H. Geist y R. R. Rindfuss. 2005. Land use and land cover change: Developing and implementing an agenda for local processes with global impacts. IHDP update is published by the international human dimensions programme on global environmental Change. 3:1-3.
- López G. E. M., G. Bocco y M. E. Mendoza Cantú. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo, el caso de la ciudad de Morelia. Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. 45:56-76.
- Medina T. N. B, 1998. Recursos Naturales. Planeación Integral. Ed. Trillas. México 220 p.
- Ramankutty N., F. Achard, D. Alves, B. L. Turner II, R. Defries, K. K. Goldewijk, L. Graumlich and R. S. Reid. Global Changes in Land Cover. IHDP update is published by the international human dimensions programme on global environmental Change. 3:4-5.
- Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2006. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado: junio 2009.

Sistema Municipal de Base de Datos (SIMBAD). 2004. Disponible en: <http://sc.inegi.gob.mx/simbad/index.jsp?c=125>. Consultado: junio 2009.

Velázquez A., J. F. Mas, J. R. Días G., R. Mayorga S., P. C: Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Instituto Nacional de Ecología Gaceta ecológica. 62: 21-37.

CAPÍTULO II

COMPARACIÓN DE MÉTODOS ESPACIALES PARA DETECTAR CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO URBANO¹

Resumen

Esta investigación describe y analiza algunos métodos de detección de cambios en el uso del suelo originado por el crecimiento urbano con la finalidad de mostrar sus ventajas y desventajas; también expone aquellos métodos que proporcionan resultados favorables fundamentados en la información geográfica y que permiten una correcta toma de decisiones en la planificación del uso del suelo urbano.

Palabras clave: Uso del suelo urbano, crecimiento urbano, planificación territorial, toma de decisiones.

COMPARISON OF SPATIAL METHODS TO DETECT URBAN LAND USE CHANGE

Summary

This research describes and discusses some methods for detecting urban land use change. It has the purpose of exposing their advantages and disadvantages, besides exposing some methods that offer appropriate outcomes regarding geographic information, allowing proper decision making in urban land use planning.

Key Words: Urban land use, urban growth, land planning, decision-making.

¹ Este capítulo fue sometido a arbitraje de la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente para su posible publicación.

2.1 Introducción

Actualmente las áreas urbanas del mundo ocupan entre 2 y 3% de la superficie (Ramankutty *et al.*, 2005) y continúan creciendo al grado de ocasionar fuertes presiones al medio natural, social y económico. El desarrollo poblacional demanda una gran cantidad de servicios y recursos, lo cual puede llegar a impactar negativamente al ambiente y deteriorar la calidad de vida de sus habitantes cuando éste no se realiza de manera planificada (USGS, 1999). Por tanto, es importante que las autoridades encargadas de la planificación territorial conozcan e implementen metodologías de planificación espacial para detectar y establecer las posibles modificaciones del crecimiento urbano y puedan reorientar y minimizar los impactos bajo un contexto de sustentabilidad.

En este proceso de planificación territorial resulta fundamental el uso de las diferentes disciplinas de la Geomática². A través de ellas se puede caracterizar espacial y temporalmente la dinámica del crecimiento urbano con cierta precisión y detalle con el propósito de generar conocimiento útil en la planificación y ordenamiento del territorio (Franklin, 2001; Herrera, 2001; Gómez, 2001; Chuvieco, 2008). Por ejemplo, mediante la captura y análisis de imágenes de satélite y/o fotografías aéreas es posible generar información geoespacial para cartografiar y monitorear el efecto de las actividades del ser humano sobre el ambiente físico (Franklin, 2001; Herrera, 2001, Chuvieco, 2008). Por su parte, los métodos basados en la teledetección³ (dependiendo de las técnicas empleadas, de la temporalidad de la información disponible y de los datos empleados) han demostrado ser una herramienta eficaz para la detección de los cambios en el uso del suelo y los ocasionados en el medio físico. Finalmente, los métodos de detección de cambios (por ej., algebra de mapas, de transformación, post-clasificación y modelación) permiten cuantificar el ecosistema natural y urbano, proporcionando una visión

² Geomática: Disciplina moderna que integra la adquisición, modelamiento, análisis y manejo de datos espacialmente referenciados (Departamento de Ingeniería Geomática, Universidad de Calgary, Canada, 2006).

³ Teledetección: Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Chuvieco, 2008).

integral de la dinámica espacio-temporal de la cobertura y los patrones del uso del suelo, contribuyendo con ello a la formulación de políticas de desarrollo regional (Treitz y Rogan, 2004).

En suma, las técnicas de geomática ayudan a detectar los cambios de uso del suelo de manera oportuna y precisa y a entender la relación e interacción entre el ser humano y los fenómenos naturales (López *et al.*, 2001; Eastman, 2003; Lu *et al.*, 2004), lo que permite a su vez tomar las medidas necesarias para contrarrestar los cambios o impactos negativos.

A diferencia de otros trabajos de análisis comparativo que usan las técnicas de detección de cambios con base a las clasificaciones basadas en la normalización radiométrica implementadas en el dominio del infrarrojo óptico (Mas, 1999; Coppin *et al.*, 2004), o en el número de bandas empleadas en las imágenes y en la selección de los umbrales apropiados (Lu *et al.*, 2004), el presente estudio presenta una revisión y análisis comparativo de los métodos espaciales más utilizados para detectar cambios de uso del suelo como prerrequisito para analizar el crecimiento urbano principalmente, además de exponer las ventajas y desventajas encontradas en la aplicación de los mismos.

2.2 Métodos de análisis de cambio de uso del suelo

La literatura sugiere tres criterios de clasificación de los métodos existentes para la detección de cambios de uso del suelo. El *primero* se fundamenta en la técnica empleada para detectar el cambio, mismo que puede estar ligado a un cambio en la reflectividad o en las texturas de la imagen, las cuales son separables y afectadas por las limitaciones espaciales, espectrales, temáticas y temporales (Lu *et al.*, 2004), e incluye los métodos de: (1) álgebra de mapas; (2) transformaciones matemáticas; (3) post-clasificación; y (4) modelación (evaluación multicriterio y autómatas celulares). El *segundo criterio* se basa en la temporalidad de la información

(Eastman, 2003) e incluye: (1) análisis bitemporal (imágenes de dos fechas); (2) análisis multitemporal (varias fechas o series de tiempo); y (3) predicción de cambios a futuro. Finalmente, el *tercer criterio* de clasificación se fundamenta en el tipo de datos empleados (Chuvieco, 2000) los cuales pueden agruparse en: Análisis de datos continuos y datos categóricos. Los datos continuos incluyen todas las metodologías numéricas tales como: Álgebra de mapas, transformaciones matemáticas y modelación; mientras que los datos categóricos se basan en una post-clasificación con matrices de cambio o a través de cadenas de Markov.

A continuación se describen brevemente los dos primeros criterios de clasificación mencionados ya que el tercero es una combinación de éstos.

2.2.1 Clasificación de los métodos según las técnicas empleadas

(1) Álgebra de mapas: Consiste en el uso de operaciones aritméticas básicas (suma, resta, multiplicación y división) para manipular y analizar datos espaciales (mapas) que permiten al usuario especificar relaciones entre mapas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El álgebra de mapas crea nuevas funciones y relaciones de atributos por la superposición de funciones de dos capas de entrada. Las características de cada capa de entrada se combinan para crear nuevas funciones de salida. Una desventaja del álgebra de mapas en la detección del cambio, es la dificultad en seleccionar convenientemente los umbrales para considerar que las variaciones numéricas no sean afectadas por cambios estacionales o por cambios propios inherentes a la escena de la imagen. Incluye técnicas como la diferencia entre imágenes, regresión entre imágenes, proporción de imágenes, diferencias de índices de vegetación, análisis de vectores de cambio y substracción de fondo. Estos algoritmos tienen una característica en común: El procedimiento puede detectar todos los cambios mayores de ciertos umbrales identificados y proporcionan la información del cambio cuantitativamente en términos de reflectancia (USGS, 1999; Romero y López, 2000; Yagüe, 2002; Azocar *et al.*, 2003; Catalán *et al.*, 2007; Compas, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

(2) Transformación: Es un conjunto de métodos de análisis espaciales que cambian (o transforman) las entidades originales, mediante comparaciones o combinaciones, utilizando principios y reglas geométricas, aritméticas o lógicas y también operadores de conversión de datos vectoriales a raster y viceversa. Estos procesos simplifican o reducen el volumen de los datos que se analizan en la imagen. Las operaciones crean bandas artificiales a partir de combinaciones entre las originales, para mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos dentro de la imagen y de la disposición de los datos de manera que sean evidentes los fenómenos de interés. Una ventaja de estos métodos es que minimizan la redundancia entre bandas, dando énfasis a la información derivada en diferentes componentes. Sin embargo, éstos no pueden proporcionar matrices de cambio detalladas, requieren la elección de umbrales para identificar las áreas de cambio y tienen dificultad en la interpretación e identificación de la información de cambio sobre las imágenes ya transformadas. Este grupo incluye transformaciones multivariadas tales como análisis de componentes principales, índice de vegetación, entre otros (Soria *et al.*, 1998; Zhao y Maclean, 2000; Lasaponara, 2005; Kumar *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

(3) Post-clasificación: Es un método generalizado que consiste en agrupar los rasgos geográficos en clases o categorías de acuerdo a características comunes reduciendo el número o variedad, y por tanto, una simplificación del mapa. El proceso inicia con el agrupamiento de los píxeles mediante clasificación automatizada o digitalización en monitor de una imagen en clases internamente homogéneas, pero diferenciables entre ellas por los valores de una o varias variables, generando así mapas que muestran las diferentes clases de uso del suelo presentes en el área de interés. Posteriormente los mapas temáticos creados para las fechas consideradas son utilizados para generar una matriz cruzada de información del cambio de uso entre las imágenes multitemporales. Su desventaja radica en la manipulación de datos históricos y del tiempo empleado para generar clasificaciones exactas. En esta categoría se incluye el análisis temporal-espectral,

algoritmos de maximización, clasificación y redes neuronales artificiales (Herrera, 2001; Hurd *et al.*, 2001; Yang y Lo, 2002; Molina, 2005; Chuvieco, 2008).

(4) Modelación: Son modelos conceptuales que describen y manipulan las características espaciales de los fenómenos geográficos. Los valores de reflectividad de la imagen son convertidos a parámetros o fragmentos basados físicamente a través de modelos lineales, no lineales o ambos. Los parámetros transformados son fáciles de interpretar y de extraer información de las firmas espectrales. La desventaja de estos métodos es el tiempo empleado y la dificultad de desarrollar modelos apropiados para convertir los valores de reflectividad de la imagen a parámetros biofísicos. Incluye el modelado de reflectividad empleada en los modelos de Li-Strahler, modelos mixtos espectrales y modelos de estimación de parámetros biofísicos (Foresman *et al.*, 1997; López *et al.*, 2001; Allen y Lu, 2003; Deal y Schunk, 2004; Aguilera, 2006; Liu *et al.*, 2007; Molero *et al.*, 2007).

Otro tipo de modelaje es el análisis multicriterio. Éstos son procesos que transforman y combinan datos espaciales del estado actual a través de reglas de decisión para generar un resultado del estado deseado, el cual se basa en la ponderación y compensación de variables que influyen de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión. Además de la información geográfica, incorpora los juicios de valor (gustos y preferencias) de los tomadores de decisión (Paegelow *et al.*, 2003; Malczewski, 2004; Liu *et al.*, 2007).

2.2.2 Clasificación de los métodos según la temporalidad de la información

(1) Análisis bitemporal: Es un análisis de tipo cualitativo o cuantitativo en el que se emplean solamente imágenes de dos fechas. En esta clasificación se incluye las técnicas de diferencia de imágenes, proporción de imagen, diferencia de regresión, análisis de vectores de cambios (análisis entre dos imágenes), calidad de datos (cruce de tablas y/o cruce de clasificación) (Eastman, 2003).

(2) Análisis multitemporal: Esta clasificación presenta también un análisis cualitativo o cuantitativo de las imágenes pero a diferencia de la clasificación anterior éstos varían en el número de fechas de análisis empleadas (más de dos), y se emplean técnicas estadísticas de series de tiempo para su análisis. Dentro de esta técnica se incluye el análisis de series de tiempo, correlación de series de tiempo, perfiles de tiempo, desviación de la imagen y análisis de vectores de cambio II (diferencia entre dos series) (Eastman, 2003).

(3) Predicción de cambios a futuro: Son técnicas que determinan probabilidades de cambio, donde la predicción espacial explica los cambios detectados posibles. Dentro de estas técnicas se incluyen las cadenas de probabilidad de análisis de Markov, autómatas celulares y análisis multicriterio (Eastman, 2003).

La Figura 2.1 presenta una visión integrada de los diferentes métodos de detección de cambios. Las técnicas aplicables al análisis de datos continuos (numéricos) incluyen la estandarización de los números digitales mediante la calibración radiométrica, esto es la conversión a radianza y posteriormente a reflectividad. Los datos categóricos se refieren al uso de mapas temáticos obtenidos de la clasificación de imágenes, ya sea supervisada mediante campos de entrenamiento o digitalización en monitor. La clasificación no supervisada es solamente un método exploratorio que apoya la aplicación de la clasificación supervisada.

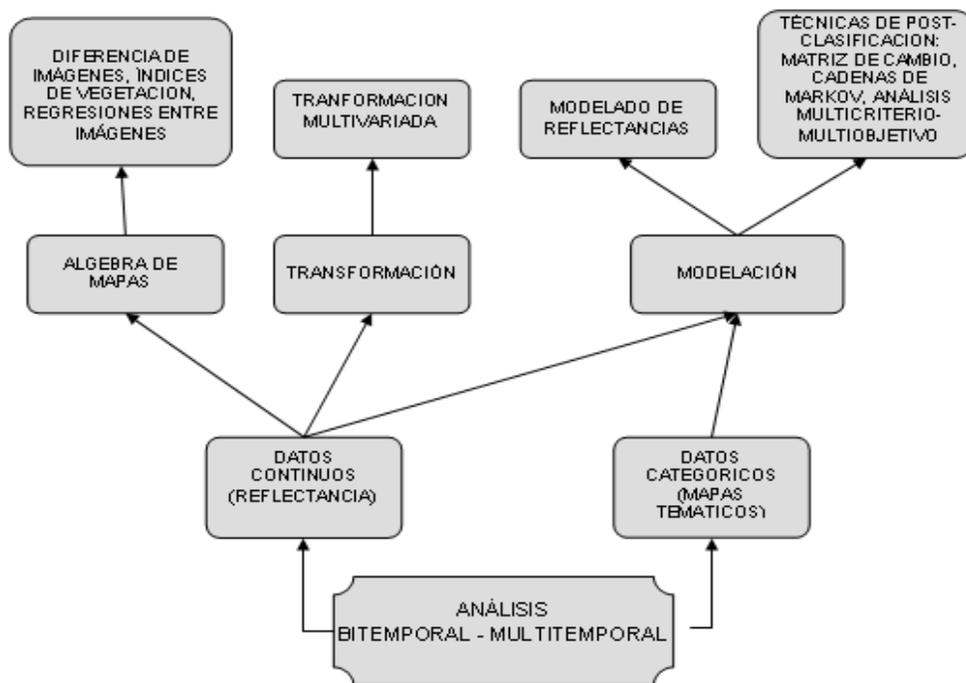


FIGURA 2.1. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIO BASADAS EN LA TELEDETECCIÓN.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Incertidumbre en el estudio del cambio de uso del suelo

Toda base de datos geográficos presenta cierto grado de incertidumbre que depende principalmente de la calidad de insumos y de la metodología adoptada para su elaboración (Mas *et al.*, 2003). Por ello, resulta conveniente aplicar algún procedimiento de verificación que permita cuantificar el error y valorar la aplicación operativa de la información geoespacial en el estudio de cambio de uso del suelo (Jensen, 1996; Chuvieco, 2000). Los errores contenidos en los mapas que se comparan temporalmente son de dos tipos: Errores inherentes a los atributos (categóricos o continuos) y errores geométricos relacionados con la ubicación espacial de la información.

Los errores de los atributos se generan en una diversidad de formas, según la metodología empleada para su elaboración. Para el caso de métodos automatizados, su origen puede ser la deficiente separabilidad de clases en las firmas espectrales en una clasificación supervisada; mientras que para los métodos manuales como la

fotointerpretación, podrá ser la escasa visibilidad del fotointerprete (debido a la resolución espacial de la imagen) o al vago conocimiento del área de estudio, lo que trae como consecuencia una deficiente asignación de etiquetas a los polígonos.

Por otra parte, los errores geométricos se generan por una deficiente georeferenciación de la información. Los mapas de un área de estudio determinada que van a ser comparados temporalmente deben coincidir espacialmente en la mayor medida posible, de lo contrario, los cambios detectados no corresponderán a la variación temporal del atributo de interés sino a una falta de correspondencia espacial (Chuvieco, 1998); es decir, se debe asegurar que tanto la zona como la variable que se compara sea la misma en ambas fechas consideradas (Chuvieco, 2008), por lo que es necesario conocer la confiabilidad de la base de datos empleada para evitar errores en el proceso de detección de cambios (Mas y Fernández, 2003), ya que al cuantificar la calidad del producto cartográfico generado permitirá valorar su ajuste con la realidad y, así asumir el riesgo en la toma de decisiones (Mas *et al.*, 2003).

Los resultados de las diferentes metodologías permiten evaluar los valores obtenidos. A mayor precisión, más adecuadamente se identificarán las áreas de cambio, por lo que la información generada presenta mayor validez (Coppin *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2004; Chuvieco, 2008).

2.3 Aplicaciones de los métodos de detección de cambio en el uso suelo de áreas urbanas

Inicialmente la teledetección empleada para el análisis urbano no tenía gran aceptación en el área de la planificación, sin embargo, recientemente con el desarrollo de la tecnología se ha incrementado la aplicación de estos métodos en el análisis urbano (Treitz y Rogan, 2004) ya que actualmente la teledetección y los SIG presentan tecnologías que permiten la detección de cambios en este tipo de áreas en

forma eficiente (Yang y Lo, 2002). Las áreas urbanas son generalmente caracterizadas por coberturas de superficies altamente heterogéneas (Yang y Lo, 2002), por lo que la interpretación y análisis en la teledetección representan cambios en las características espaciales y temporales de las superficies urbanas (Alberti *et al.*, 2004). A través del tiempo se han desarrollado diferentes métodos para la detección del cambio de uso del suelo, mismos que han evolucionando paralelamente con la teledetección y han facilitado su aplicación (Rogan y Chen, 2004). King *et al.* (1999) realizaron una revisión de los métodos de detección de cambios, mientras que Foresman *et al.* (1997), Chuvieco (2000) y Franklin (2001), Rogan y Chen (2004), Treitz y Rogan (2004) hacen una descripción de la evolución de los métodos de teledetección y análisis, los cuales son influenciados o dependientes de los avances tecnológicos. Anteriormente, los métodos de detección de cambios eran bitemporales, se comparaba la misma área en dos tiempos; sin embargo, en la actualidad los métodos se basan en el análisis de trayectoria temporal donde se compara la misma área pero en intervalos de tiempo (Coppin *et al.*, 2004).

Afortunadamente se han probado varios métodos de detección de cambios en áreas urbanas que permiten señalar las transformaciones que han experimentado la superficie, los cuales son simples y fáciles de implementar (Yang y Lo, 2002). Algunos trabajos desarrollados por Azocar *et al.* (2003) mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), índices de análisis espacial y con la implementación de fotografías aéreas estudiaron la relación entre el crecimiento urbano y el crecimiento de la población. Por su parte, Herrera (2001) empleó imágenes de satélite a través de los SIG y sistemas de posicionamiento global (GPS, siglas en inglés) para conocer los efectos de la intervención antropógena y la evolución en la ocupación del suelo.

A través del uso de imágenes de satélite y SIG, Yang y Lo (2002) identificaron áreas de cambio de cobertura y usos de suelo generados por el crecimiento urbano; por su parte, Aguilera (2006) generó dos modelos de crecimiento urbano usando fotografías

aéreas y ortofotografías empleando un SIG y autómatas celulares. Asimismo, Paegelow *et al.* (2003) emplearon cadenas de Markov y evaluación multicriterio para conocer la dinámica del paisaje. Por su parte, Catalán *et al.* (2007), a través de fotografías aéreas y un SIG, identificaron áreas de crecimiento urbano. Finalmente, Hunter *et al.* (2003) emplearon imágenes de satélite y fotografías aéreas ayudados de un SIG, para desarrollar modelos espaciales y estadísticos para conocer las alternativas posibles de escenarios futuros del crecimiento de la población y los cambios de uso del suelo.

Los métodos de detección están basados en datos multi-temporales, multi-espectrales y en sensores satelitales que han demostrado gran potencial para detectar, identificar, cartografiar y monitorear los cambios de diferentes ecosistemas independientemente de sus agentes causales (Coppin *et al.*, 2004), por lo que es necesario emplear y comparar varias técnicas, algoritmos y análisis que permitan identificar las zonas exactas de detección (Congalton y Green, 1999) y así definir la mejor opción para la detección del cambio considerando las características físicas, sociales y económicas del lugar.

El Cuadro 2.1 muestra una clasificación de las diferentes aplicaciones realizadas en el mundo sobre estudios de cambio de uso de suelo generados por el crecimiento de la población y la expansión de áreas urbanas, las cuales han empleado principalmente el álgebra de mapas, la post-clasificación y modelación en la mayoría de los estudios de caso. Además, se muestran las ventajas y desventajas de cada método.

Cuadro 2.1. Clasificación de métodos (detección y predicción) de cambio de uso del suelo, así como los datos requeridos, productos obtenidos, información relevante, ventajas y desventajas y referencia de cada uno.

Clasificación	Nombre del método	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Álgebra de mapas	SIG e índice de análisis espacial	Fotografías aéreas, cobertura de usos de suelo, zonas con hogares en diferente condición socioeconómica y densidad de población.	Obtención de tres patrones de crecimiento: Perímetro de cambio en la condición de no ciudad a ciudad, patrón por tipo de crecimiento y distribución, (anillos y agregación), y la de configuración de nuevos barrios residenciales o islas urbanas (llamado crecimiento "salto de rana")	Los patrones del crecimiento urbano conservan características de los modelos tradicionales (anillos radiales), aunque se han generado nuevas estructuras de dispersión y segregación del espacio urbano. No existen elementos urbanos que den continuidad a la ciudad, sino ciertos elementos estructurantes como barrera del crecimiento e integración urbana.	Cuantificación más precisa del cambio de superficie urbano. Análisis más detallado del cambio urbano	Se requiere especialistas para la interpretación.	Azocar G., R. Sanhueza y C. Henríquez (2003)
	Comparación de mapas	Ortofotos, fotografías aéreas, datos de cobertura del suelo y estadísticas de población.	Mapas de coberturas de suelo y cambios de la cobertura del suelo urbano.	Las áreas metropolitanas son complejas y de gran importancia en el cambio de cobertura al considerar también los usos de tipo industrial y comercial.	Presenta gran exactitud y detalle de las áreas de cambio.	La detección de áreas extensas implica costos muy altos.	Catalán B., D. Saurí, PP. Serra (2006)
	SIG	Ortofotos digitales, base de datos espaciales de: parcelas, caminos, propiedades públicas y datos hidrológicos.	Áreas de desarrollo para diferentes distancias a partir del centro de desarrollo.	El análisis de múltiples escalas detalladas muestra una vista compleja del patrón de crecimiento. El crecimiento no es eventualmente distribuido entre las diferentes formas de crecimiento.	Presenta gran énfasis en la medición de las áreas de fragmentación y expansión urbana.	Falta reconstrucción detallada de los patrones de cambio. Cada área difiere las tendencias de cambio según la escala empleada.	Compas E. (2007)
	SIG	Fotografías pancromáticas, digitales, aéreas y cartas topográficas	Creación de fotomapa, base de datos geográfica y mapa de cambios de áreas urbanas.	Los mosaicos cartográficos digitales son útiles para documentos cartográficos. Los desplazamientos de las fotografías nunca son iguales o similares, aunque se emplee la misma foto.	Presentan mayor exactitud cartográfica para registrar y cuantificar cambios en las áreas urbanas.	Presenta precisión solo en áreas urbanas planas y se requiere de mucho tiempo para realizar el proceso de detección de cambio.	Romero H. D., J. López B. (2000)

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación	Nombre del método	Datos requeridos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Álgebra de mapas	SIG	Mapas históricos, fotografías aéreas e imágenes de satélite.	Base de datos del cambio y uso del suelo.	Los datos dinámicos de un área urbana permiten evaluar los impactos en el ambiente para delimitar el crecimiento urbano.	Muestran los cambios urbanos en un periodo muy amplio.	Muestra la superficie de cambio pero no se observa el detalle	USGS (1999)
	Diferencias de imágenes	Imágenes de satélite	Mapas de cambios de uso de suelo	Los cambios de uso urbano están determinados por las políticas del gobierno y por el espacio.	Detección, seguimiento y evaluación del cambio de uso del suelo en áreas peri-urbanas.	Resolución espacial pequeña por lo que el detalle y precisión es menor. Empleo de mayor tiempo por el tipo de proceso	Yagüe B. J. (2002)
	SIG	Imágenes de satélite y bases de datos digitales del uso del suelo.	Áreas de expansión urbana, por tipos de ocupación del suelo.	Expansión urbana afecta principalmente las áreas agrícolas.	Combina eficazmente la integración de imágenes de satélite para cartografiar y analizar los cambios urbanos.	Requiere varios especialistas porque combina diferentes áreas de conocimiento (suelo, teledetección y SIG)	Zhang X., J. Chen, M. Tan y Y Sun (2007)
Post-clasificación	Clasificaciones: supervisadas, no supervisadas y redes neuronales	Fotografías aéreas e imágenes de satélite de diferentes sensores.	Clasificación multitemporal	La clasificación supervisada muestran claramente las posibilidades y limitantes del crecimiento.	Presenta mejor interpretación visual y rapidez las ortofotos.	La visualización de las imágenes depende de su resolución.	Herrera V. (2001)
	Clasificación no supervisada	Imágenes de satélite	Cartografía de fragmentación forestal y expansión urbana.	Análisis de correlación en la identificación en los cambios de cobertura.	Proporciona áreas de cambio generadas por el desarrollo urbano sobre el bosque.	El detalle de la detección depende de la escala empleada.	Hurd J. D., E. Hoffhine W., Steven G. Lammey. y D. L. Civco (2001)
	Clasificación supervisada y comparación de imágenes	Imágenes de satélite	Imagen de áreas estables y dinámicas de la cobertura del suelo.	El uso del suelo esta condicionado por el crecimiento urbano y a los usos no agrícolas. Presenta mayor concentración de la urbanización en áreas planas	Las imágenes de satélite con tratamiento digital genera imágenes categorizadas para obtener la detección de cambio de uso del suelo urbano.	Se requiere conocimiento previo en el uso de imágenes de satélite y técnicas estadísticas.	Molina M. G. Z. (2005)
	Post-clasificación y SIG	Imágenes Landsat MSS y TM	Mapa de uso y cobertura del suelo de densidad urbana y mapas de cambios de uso y cobertura del suelo del área urbana.	Los sensores remotos permiten una vista retrospectiva de grandes regiones y proveen información geográfica y temporal de las áreas urbanas.	Las áreas de cambio presentan gran exactitud y compatibilidad.	Es necesario aplicar varios procedimientos para eliminar errores de confusión de límites espectrales.	Yang X. y C. P. Lo (2002)

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación	Nombre del método	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Transformación	Clasificaciones , técnicas estadísticas multivariadas y modelación	Base de datos cartográfica de límites municipales, caminos, vías férreas, topografía e imágenes de satélite.	Cartografía de la clasificación de imágenes, crecimiento de la población y densidad de dases de uso.	Los sensores remotos y los SIG son técnicas empleadas en monitorear y modelar un fenómeno dinámico. La expansión urbana es un fenómeno dinámico y la predicción futura es un gran cambio que es cuantificado.	Cuantificación de la entropía expansión urbana, mediante la selección de bandas adecuadas.	Las firmas pueden representar una gama estrecha de los valores de reflectividad.	Kumar J. M., P. K. Garg y D. Khare (2007)
	Técnicas de transformación espectral (Análisis discriminativo canónico) y análisis de componentes	Imágenes de satélite	Imágenes de componentes transformadas usando análisis de componentes principales e imágenes de componentes transformados usando análisis discriminativo canónico.	El valor de la variación del ruido esta asociado con la técnica empleada y a los datos satelitales.	La exactitud de los índices de kappa es superior mediante el empleo de imágenes transformadas.	Requiere de mucho tiempo para identificar las variables independientes que generan la máxima separabilidad.	Zhao G. y A. L. Madean (2000)
Modelación	Modelos de predicción: Regresión logística y autómatas celulares	Fotografías aéreas, ortofotos, base de datos cartográfica de variables.	Modelos de crecimiento: con regresión logística, mayor correlación con la variable de distancia a zonas urbanas. Con autómatas celulares valores altos de correlación con todas las variables.	Contradicción al no haber correlación con las áreas destinadas para urbanización. Mayor confiabilidad en la cartografía generada por autómatas celulares.	Regresión logística determina las relaciones funcionales entre variables. Los autómatas celulares y la regresión logística son capaces de predecir alternativas de urbanización.	Los modelos estadísticos no son totalmente adecuados en el análisis de similitudes.	Aguilera B. (2006)
	Estructura logística binomial	Imágenes de satélite, datos espaciales y características específicas del sitio: Población y tasa de crecimiento.	Se genera un modelo regional moderado en la predicción de áreas urbanas	El modelo logístico es poco preciso en la proyección de escenarios futuros.	Predice las probabilidades de transición de cambio de uso del suelo y simula el crecimiento urbano El modelo logístico es estáticamente confiable a corto plazo.	Es necesario emplear varios modelos para realizar una predicción a largo plazo.	Allen J. y K. Lu (2003)

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación	Nombre del método	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Modelación	Autómatas celulares	Base de información geográfica y socioeconómica	Diferentes escenarios de crecimiento con alta y baja densidad de población.	Considera factores económicos y fiscales en el dominio de los escenarios de crecimiento.	El modelado espacial y dinámico es adecuado para modelar la dinámica urbana.	La utilización del suelo cambia las decisiones a nivel individual. El modelo final es determinado por los costos y la alta y baja densidad.	Deal B. y D. Schunk (2004)
	SIG y series de tiempo	Base de información geográfica y cronológica de usos de suelo, datos de censos e imágenes de satélite y parámetros ambientales.	Mapas de transformación de suelo inducido por el hombre.	Aplica tres formas de análisis: Central, cartografía histórica y análisis de gradientes, para datos espaciales y temporales relacionados con ecosistemas urbanos.	Los mapas empleados determinan la tendencia de la urbanización. La modelación contempla aspectos ecológicos, sociales e hidrológicos.	Las escalas empleadas determinan los patrones y funciones a emplear en el modelo.	Foresman T., S. T. A. Pickett y W. C. Zipperer (1997)
	Análisis multicriterio y SIG	Imágenes de satélite, información cartográfica de uso de suelo, geológicos, sistemas de agua, distribución de la vegetación, datos ambientales, ecológicos y socioeconómicos.	Dos escenarios de predicción de cambio: a) rápido crecimiento de uso residencial, industrial y público, b) aumento del valor a la agricultura, turismo y comercio,	Análisis sistemático de modelación dinámica para conservar ecosistemas acuáticos, desarrollado para proveer estrategias de manejo en balance con la expansión urbana.	Determina la variación del potencial de ocupación del suelo. Modela una estructura jerárquica de la ocupación del suelo.	Se requiere de más de un método para obtener resultados óptimos.	Liu Y., X. Lv, H. Guo, Y. Yu, J. Wang y G. Mao (2007)
	SIG, Cadenas de Markov y análisis de regresión	Fotografías aéreas, imagen digital, información cartográfica (topografía, geología, edafología e información demográfica)	Cartografía: Cambio de cobertura y uso del suelo, y predicción del cambio. Matrices de Markov	El modelo de Markov presenta bajo nivel en la predicción de cambio con respecto a las regresiones lineales.	El modelo de predicción puede ser extrapolado a áreas similares caracterizadas por el crecimiento urbano y cambio de cobertura.	El crecimiento de la población no produce necesariamente un incremento en el área urbana.	López G. E. M., G. Bocco y M. E. Mendoza Cantú (2001)
	Método de evaluación multicriterio	Base de datos cartográfica de variables ambientales y antropicas. Criterios de aptitud e impacto	Cartografía de diferentes factores y del crecimiento urbano. Modelo cartográfico y de escenario de aptitud para urbanización.	Los patrones de crecimiento son de crecimiento interanual, continuo y logístico. Las proyecciones de la población se basan en la tasas históricas	Determina la trayectoria de los asentamientos humanos.	Se requiere actualizar los patrones de cambio	Molero M. E., A. L. Grindlay M. y J. J. Asensio R. (2007)

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Análisis comparativo de los métodos de detección de cambios en el uso del suelo en áreas urbanas

El desafío de la teledetección para detectar cambios en áreas urbanas ha catalizado el desarrollo de técnicas más precisas para que dichos cambios coincidan con aplicaciones medioambientales (Coppin *et al.*, 2004). Estas aplicaciones son generadas como mecanismos de respuesta a la alta complejidad de los componentes urbanos (Yagüe, 2002); sin embargo, en muchas ocasiones las limitaciones existentes afectan la toma de decisiones, por lo que una planificación acertada supone a futuro grandes beneficios (Chuvienco, 2008).

Los cambios en el uso de suelo de áreas urbanas pueden ser monitoreados en forma complementaria por diferentes métodos a la vez, con resultados positivos que permiten detectar una amplia gama de cambios (Coppin *et al.*, 2004). En la implementación de los métodos de detección de cambios es necesario asegurar que la fuente de información y base de datos a utilizar sea de calidad, y que permitan aplicar metodologías y procedimientos comparables (Lu *et al.*, 2004). Mediante el análisis detallado de los estudios de detección de cambios revisados de la literatura, se observa que la elección de un método de detección de cambio apropiado es complejo (Coppin *et al.*, 2004), sin embargo existen elementos básicos que toda técnica idónea de detección de cambio de uso del suelo en áreas urbanas debe proporcionar: (1) rango y áreas de cambio; (2) distribución espacial de los tipos de cambio; (3) trayectoria de los cambios de cobertura del suelo; y (4) la valoración de la exactitud de los resultados en la detección del cambio (Lu *et al.*, 2007). No obstante, los diferentes métodos de detección, modelación y proyección de los cambios de uso del suelo tienen sus propios méritos y ningún procedimiento es óptimo y aplicable a todos los casos (Lu *et al.*, 2007).

El uso de alguna técnica depende del detalle que se requiera en el análisis y del costo de su implementación. Procesos con poco detalle suelen tener bajos costos y éstos se incrementan con el mismo (Chuvienco, 2008). Otros factores que determinan el método a utilizar son: La información con la que se cuente, el propósito del trabajo y de los recursos disponibles. Si el enfoque está orientado a

evaluar lo que ha pasado con cada clase de vegetación o uso de suelo, el método ideal es la matriz de cambios construida con mapas temáticos elaborados previamente, ya sea con clasificación supervisada (máxima verosimilitud, distancia de mahalanobis, redes neuronales, entre otros) o digitalización en monitor (Romero y López, 2000). Si se desea predecir los cambios por clase temática dentro de las alternativas existentes se sugiere: (1) cadenas de Markov para el cálculo de la matriz de probabilidades de transición, elaboración de mapas de aptitud para cada clase y mapeo espacial de dichas proyecciones en un periodo de tiempo determinado mediante autómatas celulares (López *et al.*, 2001; Paegelow *et al.*, 2003); y (2) la evaluación multicriterio, que más que una predicción de lo que pasará con el uso de suelo, se refiere al uso óptimo deseable del espacio con base en diferentes criterios de optimización y ponderación de los factores empleados. Si el enfoque deseado es hacer una estimación numérica del cambio con fines cuantitativos a nivel píxel, por ejemplo, evaluar la dinámica espacio-temporal de la biomasa o combustibles, el estudio fenológico de alguna especie vegetal o la medición de la temperatura de las áreas urbanas, es conveniente el empleo de métodos orientados a datos numéricos donde la calibración radiométrica, la selección de un umbral de cambio significativo y la medición de la información en campo son imprescindibles.

2.5 Conclusiones

El método a utilizar para analizar la dinámica de cambio de uso del suelo generada por el crecimiento urbano depende del conocimiento, capacitación y habilidad del analista sobre los métodos de detección de cambios existentes y de los datos de la imagen utilizada, así como de las características del área de estudio. Adicionalmente, la selección de la técnica dependerá del aspecto a evaluar, de la calidad de información a generar y del costo de implementación. Así, ningún método es aplicable para todos los casos, pero si es imprescindible el empleo de uno o varios de ellos para que la autoridad y los tomadores de decisiones puedan conocer el alcance de los cambios registrados, los riesgos que ello implica, y de ser posible identificar los agentes que causan el cambio con fines de seguimiento de la planificación territorial.

2.6 Literatura citada

- Aguilera B. F. 2006. Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus* 6:81-112.
- Alberti M., Robin W., y Stefan C. 2004. Urban land-cover change analysis in central Puget sound. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 70(9):1043-1052.
- Allen J. y K. Lu. 2003. Modeling and prediction of future urban growth in the Charles region of South Carolina: A GIS-based integrated approach. *Conservation Ecology*. 8 (2):20.
- Azocar G., R. Sanhueza y C. Henríquez. 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: El caso de Chillán en Chile Central. *Revista Eure*. XXIX 87:79-92.
- Catalán B., D. Saurí y P. Serra. 2007. Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona metropolitan region 1993-2000. *Landscape and Urban Planning*. 11 p.
- Chuvieco E. 1998. El factor de temporalidad en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*. 10:1-9.
- Chuvieco E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Alcalá-Madrid. España. 568 p.
- Chuvieco E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel S. A. 3ª edición, Barcelona España. 594 p
- Compas E. 2007. Measuring exurban change in the American west: a case study in Gallatin county, Montana, 1973-2004. *Landscape and Urban Planning* 82:56-65.
- Congalton G. y Green K. 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Ed. Lewis Publishers. New York. 137 p.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. y E. Lambin. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. J. Remote Sens.* 25(9):1565-1596.
- Deal B. y D. Schunk. 2004. Spatial dynamic modeling and urban land use transformation: A simulation approach to assessing the costs of urban sprawl. *Ecological Economics*. 5:9-95.

- Eastman R. 2003. Guide to GIS and image processing. Kilimanjaro Tutorial. Clark Labs. USA. 328 p.
- Foresman T. W., T. T. A. Pickett y W. C. Zipperer. 1997. Methods for spatial and temporal land use and land cover assessment for urban ecosystem and application in the greater Baltimore-Chesapeake region. *Urban Ecosystem*. 1:201-216.
- Franklin S. 2001. Remote sensing for sustainable forest management. Lewis Publishers. United States of America. 406 p.
- Gómez O. D. 2001. Ordenación territorial. Ediciones Mundi-Prensa. España. 704 p.
- Herrera V. 2001. Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG, y equipos GPS. *Revista de Teledetección*. 15:1-9.
- Hunter L. M., M. de J. Gonzalez G., M. Stevenson, K. S. Karish, R. Toth, T. C. Edwards, R. J. Lillholm, y M. Cablk. 2003. Population and land use change in the California Mojave: Natural habitat implications of alternative futures. *Population Research and Policy Review*. 22:373-397.
- Hurd J. D., E. Hoffhine W., Steven G. Lammey y D. L. Civco. 2001. Characterization of forest fragmentation and urban sprawl using time sequential Landsat imagery. ASPRS Annual Convention. Annual Convention, St. Louis. MO. 12 p.
- Jensen J. R. 1996. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. Prentice Hall. United States of America. 318 p.
- King M. D., Y. J. Kaufman, D. Tanré y T. Nakajima. 1999. Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from space: past, present and future. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 11(80):2229- 2259.
- Kumar J. M., P. K. Garg y D. Khare. 2007. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*. 10:26-43.
- Lasaponara R. 2005. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from spot/vegetation NDVI temporal series. *Ecological Modelling*. 4229:1-6.

- Liu Y., X. Lv, X. Qin., H. Guo., Y. Yu., J. Wang y G. Mao. 2007. An integrated GIS-based analysis system for land-use management to lake areas in urban fridge. *Landscape and urban planning*. 82:233-246.
- López G. E. M., G. Bocco y M. E. Mendoza Cantú. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo, el caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 45:56-76.
- Lu D., P. Mausel, E. Brondizio y E. Moran. 2004. Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis. 25(12):2365-2407.
- Malczewski J. 2004. GIS-bases land use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning*. 62:3-65.
- Molero M. E., A. L. Grindlay M. y J. J. Asensio R. 2007. Escenarios de aptitud y modelación cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus*. 7:120-147.
- Molina M. G. Z. 2005. Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando teledetección: Macaray, estado Aragua-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*. 46(2): 195-234.
- Mas J. F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *Int. J. Remote Sens*. 20(1):139-152.
- Mas J. F., Días G. J. R. y Pérez V. A. 2003. Evaluación de la confiabilidad de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 51:53-72.
- Mas J. F. y T. Fernández. 2003. Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 51:73-87.
- Paegelow M., M. T. Camacho y J. Menor. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelación prospectiva del paisaje. *GeoFocus*. 3:22-44.
- Ramankutty N., F. Achard, D. Alves, B. L. Turner II, R. Defries, K. Goldewijk, L. Graumlich y R. S. Reid. 2005. Global changes in land cover. IHDP Update is published by the international Human Dimensions Programme on Global Environmental Change. 20 p.

- Rogan J y D. M. Chen. 2004. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*. 61:301-325.
- Romero H. D. y J. López B. 2000. Producción e integración de fotomapas digitales para la evaluación del crecimiento urbano en el municipio de Texcoco, Estado de México: Período 1970-1989-1997. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 42:48-66.
- Soria R. J., C. A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke Haller. 1998. Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales, experiencias en México. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAyT), Colegio de Postgraduados y Sociedad Mexicana de la ciencia del Suelo A. C. 93 p.
- Treitz P. y J. Rogan. 2004. Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. *Progress in Planning*. 61:269-279.
- Universidad de Calgary. 2010. Ingeniería geomática Departamento de Ingeniería Geomática. Disponible: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/about/whatis>. Consultado: Enero 2010.
- USGS Science for a changing World. 1999. Analyzing land use change in urban environments. USGS. U. S. Geological Survey. 4 p.
- Yagüe B. J. 2002. Teledetección y transformación de territoriales en el sur-este de Madrid en el cambio de siglo (1999-2001). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense. Volumen extraordinario*: 519-530.
- Yang X. y C. P. Lo. 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *Int. J. Remote Sens.* 23(9):1775-1798.
- Zhang X., J. Chen, M. Tan y Y. Sun. 2007. Assessing the impact of urban sprawl on soil resources of Nanjing city using satellite images and digital soil databases. *ScienceDirect, Catena*. 69:16-30.
- Zhao G. y A. L. Maclean. 2000. Principal component analysis for spectral transformation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 66(7): 841-847.

CAPÍTULO III

DETECCIÓN Y PREDICCIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO POR CRECIMIENTO URBANO EN LA CUENCA DE METZTITLÁN, HIDALGO

Resumen

La detección y modelación del cambio de uso de suelo debido al incremento de la población es fundamental en la evaluación del crecimiento urbano y sus implicaciones en el ambiente. En este estudio se realizó la detección y modelación del cambio de uso de suelo generado por el incremento de la población en las Ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán de la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo, con la finalidad de conocer y estimar el área de expansión urbana en los años, 2010, 2015 y 2020 para fines de planificación urbana. El modelo base de crecimiento urbano fue correlacionado con algunas variables que condicionan dicho crecimiento tales como carreteras principales, carreteras secundarias, cercanía a ríos y pendiente. Los resultados obtenidos indican un incremento del uso del área urbana en el periodo de 1977-1996 de 141.57 hectáreas (ha) para Atotonilco, 587.97 ha para Tulancingo y 393.84 ha para Zacualtipán. La proyección del crecimiento urbano, asumiendo un incremento de la población, indica una adición al poblado de Atotonilco de 48.34 ha para 2010, 43.09 ha para 2015 y 38.93 ha para 2020. Para Tulancingo se estimó un incremento de 633.17 ha para 2010, 636.12 ha para 2015 y 631.43 ha para 2020. Para Zacualtipán se tuvo un estimado de 104.18 ha para 2010, 102.69 ha para 2015 y 100.38 ha para 2020.

Palabras claves: crecimiento urbano, planificación urbana, cambio de uso del suelo.

Summary

The detection and modeling of land use change due to population growth is essential in the evaluation of urban growth and its implications on the environment. This study was carried out with the purpose of detecting and modeling the land use change generated by the increase of population in the cities of Atotonilco, Tulancingo and Zacualtipán in the Metztitlán Basin, Hidalgo, in order to understand and estimate the growth of the urban area in the coming years, looking to 2010, 2015 and 2020 for urban planning purposes. The base model of urban growth was correlated with variables such as main roads, secondary roads, proximity to rivers and terrain slope. The obtained results indicate an increase of urban land use, in the period 1977-1996, of 141.57 hectares (ha) for Atotonilco, 587.97 ha for Tulancingo and 393.84 ha for Zacualtipán. Urban land use projections, assuming population growth, indicate urban area increments as follows: Atotonilco, 48.34 ha for 2010, 38.93 ha for 2015, and 43.09 ha for 2020; Tulancingo, 633.17 ha for 2010, 636.12 ha for 2015, and 631.43 ha for 2020; Zacualtipán, 104.18 ha for 2010, 102.69 ha for 2015, and 100.38 ha for 2020.

Keywords: urban growth, urban planning, land use change.

3.1 Introducción

El crecimiento urbano es usualmente asociado al incremento de la concentración de la población en un área, ampliando la urbanización y los cambios en los patrones de uso y cobertura del suelo (Kumar *et al.*, 2007), los cuales ocasionan impactos desfavorables en el ambiente, particularmente cuando tal proceso ocurre desordenadamente.

Hace cien años aproximadamente, 15% de la población del mundo vivía en áreas urbanas, actualmente vive un 50%. A principios del siglo XX habían 16 ciudades en el mundo con alrededor de un millón de personas, sin embargo, en la actualidad existen más de 400 ciudades con más de un millón de habitantes (Cohen, 2004). La población es un factor importante en el uso y cobertura del suelo por lo que es necesario realizar trabajos de análisis y detección de dichos cambios (Liu *et al.*, 2007) para determinar las áreas óptimas de desarrollo urbano bajo criterios de sustentabilidad.

La investigación sobre el crecimiento urbano y sus impactos sobre los recursos naturales iniciaron a mediados de 1990 (Catalán, 2007). Últimamente estos estudios se han intensificado gracias al apoyo de los avances tecnológicos como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG)⁴ y la teledetección⁵, los cuales permiten monitorear los procesos dinámicos de los recursos naturales y el ambiente (Chuvienco, 1998; Villalvazo *et al.*, 2002; Treitz y Rogan, 2004; Chuvienco, 2008), incluyendo la determinación y modelación de los cambios que se producen en los usos del suelo (Green *et al.*, 1994; Otero, 1999; Gutiérrez y Gould, 2000; Kumar *et al.*, 2007). Asimismo, el empleo de modelos con bases de datos geográficos integrados en un SIG permiten la detección de cambios de uso del suelo en áreas urbanas de manera confiable por la eficiencia y exactitud espacial que otorgan (Sandoval y Oyarzum, 2004).

⁴ Los SIG son programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos con algún tipo de componente espacial (Otero, 1999; Chuvienco, 2000; Treitz y Rogan, 2004).

⁵ La Teledetección es una disciplina independiente unida por la orientación medio-ambiental, que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Yang y Lo, 2002; Chuvienco, 2008).

La información generada por los modelos de cambios de uso y cobertura del suelo permiten predecir la expansión urbana y suburbana lo cual es fundamental en la planificación del territorio (Yang y Lo, 2002; Sandoval y Oyarzum, 2004; Kumar *et al.*, 2007) además de prevenir desastres naturales y problemas concernientes a las actividades humanas y al ambiente (Soria *et al.*, 1998).

La Cuenca de Metztitlán, Hidalgo cuenta con tres ciudades principales: Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán ubicadas al Centro, Sur y Norte de la misma. El crecimiento poblacional urbano de estas ciudades ha sido muy rápido en los últimos años. Lo anterior ha causado una conversión rápida en los usos del suelo de natural o agrícola a usos residenciales, manufactureros, industriales y comerciales impactando los componentes biofísicos y ambientales, además de los sociales y económicos de la cuenca.

Por lo anterior, el presente trabajo pretende analizar la dinámica y patrones que rigen los cambios de uso del suelo causado por el crecimiento poblacional urbano en las ciudades mencionadas con la finalidad de aportar elementos que permitan generar una herramienta de planificación que sea de utilidad a los tomadores de decisión encargados de la planificación urbana.

Objetivos

Identificar, analizar y cartografiar el cambio de uso del suelo en áreas de crecimiento urbano de las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, dentro de la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo en el periodo de 1977 a 1996; y

Estimar el cambio de uso futuro (año 2020) del avance urbano de las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán en la cuenca bajo estudio.

3.2 Dinámica de la urbanización

El proceso de urbanización es un fenómeno universal (Sudhira *et al.*, 2004) que se presenta con el aumento y concentración poblacional en las ciudades⁶ y con la proliferación de la vida urbana. Este proceso representa uno de los acontecimientos sociales más característicos del siglo XX (Villalvazo *et al.*, 2002; Sudhira *et al.*, 2004). Durante este periodo la población del mundo se ha urbanizado de manera acelerada, ya que la cantidad de personas que habitan las ciudades pasó de mil millones de habitantes urbanos en 1961 a tres mil millones en 2003, y se estima que para el 2030 la cifra sea de 5 mil millones. Esto significa que el 60% de la población mundial habitará en las ciudades. Con respecto a la proporción total de la población urbana ésta creció del 13% en 1900, al 29% en 1950 y al 49% en el año 2005 (Antequera, 2007). Mientras que la urbanización de México en el siglo XX se aceleró de manera notable en la década de 1940, el país se ha transformado poco a poco hacia un dominio urbano (Villalvazo *et al.*, 2002).

El incremento de la población mundial ha tenido efectos en las actividades agropecuarias y económicas, pero el crecimiento demográfico no muestra la interacción más importante entre los seres humanos y el ambiente, que es la dependencia total del ser humano al ambiente. Esto es principalmente por que la urbanización es un proceso creciente e irreversible tanto a nivel global como en nuestro país (Antequera, 2007). Además, la urbanización es un proceso de gran trascendencia y con enormes implicaciones económicas y sociales, que tiene una trayectoria relativamente autónoma con respecto a otros procesos económicos y sociales significativos (CEPAL y Hábitat, 2000), siendo más agudo en las zonas menos desarrolladas del planeta, ya que ahí es donde se ha incrementado de 2,300 millones a 3,900 millones de personas en los últimos 25 años y para el 2030 se espera que 56% de la población de los países en desarrollo viva en áreas urbanas (Antequera, 2007).

⁶ Una ciudad es un centro vital en los cuales se concentra el poder económico, político, social, cultural y demográfico, esta es una estructura cuyas ventajas comparativas y competitivas son superiores al resto de las estructuras espaciales (Villalvazo *et al.*, 2002).

Los trabajos de investigación en las áreas urbanas han surgido por la preocupación del incremento en los cambios sociales espaciales en las grandes ciudades (Galindo *et al.*, 2004; Herce, 2005). Por lo anterior, es importante comprender el aumento de la tasa de expansión urbana con respecto a la dinámica de expansión y evolución de la urbanización para generar estrategias de desarrollo sostenibles con el ambiente (Sudhira *et al.*, 2004),

3.3 Modelación del crecimiento urbano

La detección de la evolución de la cubierta del suelo se ha llevado a cabo habitualmente considerando las variaciones registradas, e identificando la localización y magnitud con que éstas se han producido (Alarcón, 2006). Para comprender la dinámica de fenómenos tales como la expansión urbana, se requiere del análisis del cambio de uso y de la identificación del patrón espacial de la expansión de las zonas urbanas (Sudhira *et al.*, 2004) a través de la comparación vinculada con la estabilidad de los sistemas sociales y ecológicos (Veldkamp y Lambin, 2001).

Los patrones espaciales resultan de las correlaciones entre elementos de estructuras y procesos espaciales. Las estructuras espaciales se entienden como la organización local interna de una distribución en el espacio, en este caso las ciudades. Mientras que los procesos espaciales son los mecanismos que originan la distribución de tales estructuras espaciales (Azócar *et al.*, 2003; Borsdorf, 2003; Henríquez y Azócar, 2006). Por tanto, el tiempo y el espacio son fundamentales para comprender los patrones espaciales del crecimiento urbano, ya que cada período histórico genera estructuras espaciales representadas por técnicas y objetos característicos de ese tiempo y formas de acción (Borsdorf, 2003). De esta manera, la identificación de estos parámetros aunado a un modelo de cambio determina el posible crecimiento urbano.

Los modelos de cambio de uso del suelo representan parte de la complejidad de los sistemas de uso del suelo (Veldkamp y Lambin, 2001). Estos modelos cuando se combinan con los SIG y la teledetección para la obtención de bases de datos

permiten cuantificar, dar seguimiento, y posteriormente, predecir el fenómeno de la expansión urbana (Sudhira *et al.*, 2004). Es decir, permiten entender los procesos de cambio y predecir alternativas futuras a través del análisis de sensibilidad de las variables en la evolución y estabilidad de los sistemas terrestres (Veldkamp y Lambin, 2001), siendo su principal objetivo la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la precisión sobre el cambio de uso del suelo en un determinado territorio (Henríquez *et al.*, 2006).

El desarrollo de un modelo de simulación del crecimiento urbano, incorpora información biofísica, socioeconómica y demográfica, aplicando una función de decisión espacial con ajustes dinámicos (Alarcón, 2006). Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de áreas urbanas actuales, las principales vías de comunicación, la distancia a mercados de trabajo, bienes e insumos, las condiciones topográficas, entre otros (Veldkamp y Lambin, 2001; Henríquez *et al.*, 2006). Ningún modelo incorpora todos los aspectos de la realidad, pero proporciona información del comportamiento urbano bajo un rango de condiciones (Veldkamp y Lambin, 2001).

La idea de estos modelos es la simulación de escenarios a partir de probabilidades observadas de la realidad en un determinado uso, considerando el impacto de una serie de variables (Alarcón, 2006) mediante el análisis espacial y temporal para identificar el patrón de expansión y, posteriormente, predecir el origen de la futura expansión urbana (Sudhira *et al.*, 2004).

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada principalmente a: (a) Explorar los diferentes mecanismos que generan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales; (b) Proyectar los impactos potenciales del ambiente y socioeconómicos derivados de los cambios de uso del suelo, y (c) Evaluar la influencia de alternativas de políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo (Henríquez *et al.*, 2006; Molero *et al.*, 2007) a través de la incorporación de los factores sociales, políticos y económicos. Sin embargo, en muchas ocasiones esto se torna difícil por la falta de datos espaciales y por

problemas metodológicos que vinculen los datos sociales y naturales (Veldkamp y Lambin, 2001).

Los modelos deben ser capaces de generar conjeturas fiables en el futuro o de manera retrospectiva, para ello es necesario vincular los procesos dinámicos y los modelos de cambios de uso del suelo a modelos de procesos biofísicos, para representar las reacciones biofísicas de los cambios de uso del suelo y la adaptación del uso del suelo a cambios biofísicos (Veldkamp y Lambin, 2001).

Inicialmente los esfuerzos encaminados a la modelación del cambio del uso del suelo generado por el crecimiento se han centrado principalmente en atributos biofísicos (Veldkamp y Lambin, 2001) como el área de expansión urbana, altitud, pendiente, cercanía a caminos principales o secundarios, lo cual ofrece una visión general de los métodos utilizados en la modelación para extraer datos cuantitativos para la cobertura del cambio de uso del suelo de manera actual y potencial para aplicaciones en la planificación (Treitz y Rogan *et al.*, 2004).

En la modelación de patrones espaciales del cambio de uso del suelo existen dos aproximaciones que predominan: (a) modelos basados en la regresión, y (b) modelos basados en una transición espacial. Los modelos basados en la regresión establecen una relación entre un intervalo amplio de variables predictivas y probabilidades de cambio de uso del suelo. Generalmente se usan aproximaciones lineales, como regresión logística, regresiones no lineales, vinculadas a redes neuronales y modelos aditivos generalizados (Veldkamp y Lambin, 2001; Chuvieco y Martín, 2004; Henríquez *et al.*, 2006; Chuvieco, 2008). Estas técnicas de regresión aplican estimaciones de tipo estadístico para explicar la ocurrencia (Chuvieco y Martín, 2004; Eastman, 2003; Paegelow *et al.*, 2003; Chuvieco, 2008).

Los modelos basados en la transición espacial asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central, a través de los efectos espaciales que rigen la dinámica de cambio con respecto a los patrones de comportamiento en el estudio de modelos de crecimiento urbano. Comprenden principalmente las técnicas estocásticas basadas en el método de

Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Veldkamp y Lambin, 2001; Sudhira *et al.*, 2004; Chuvieco y Martín, 2004; Henríquez *et al.*, 2006; Chuvieco, 2008).

Los escenarios, objetos y situaciones integran todos los factores relevantes del crecimiento urbano, cada uno de ellos establecido por metodologías asociadas a los tres principales componentes en el estudio de crecimiento urbano: La ocurrencia, el comportamiento y sus efectos (Eastman, 2003; Paegelow *et al.*, 2003) como factores determinantes del crecimiento urbano.

Regresión logística

Una regresión representa el análisis de la relación entre variables cuantitativas que describen la asociación e interacción entre éstas, y origina estimaciones de probabilidades; es decir, evalúa en que medida una de las variables puede ser explicada por otra variable, y es planteada con un modelo estadístico (Agresti, 1990; Said, 2003; Montgomery, 2004).

El modelo de regresión logística es un método normalmente utilizado para el análisis de datos dicotómicos principalmente (Agresti, 1990), describe la relación entre la variable independiente (x) y la dependiente (y). Existe una sola variable dependiente o de respuesta y que depende de k variables o regresores, por ejemplo x_1, x_2, \dots, x_k (Said, 2003; Montgomery, 2004). Las variables usadas en el modelo pueden ser cuantitativas o cualitativas. Las variables cuantitativas son aquellos niveles que pueden asociarse en una escala numérica, en tanto que las variables cualitativas son niveles que no pueden ordenarse por magnitud, ya que no existe ninguna razón para ordenarlos bajo algún criterio numérico particular (Montgomery, 2004).

La regresión logística es una técnica estadística flexible ya que la naturaleza de los datos introducidos puede ser continua y/o categórica; por otra parte, no requiere el principio de normalidad (la normalización aporta mayor robustez al análisis) (Agresti, 1990; Eastman, 2003; Said, 2003; Montgomery, 2004).

La regresión logística es una variante de la regresión lineal tradicional con variable dependiente dicotómica y variables independientes continuas y/o discretas. En el modelo de regresión logística, la variable dependiente puede tomar un valor “1” o “0” en cada observación dependiendo de una condición predeterminada y estos valores son usados en un proceso ajustado a un modelo que predice los valores que son números continuos entre 1 y 0. Este valor predictivo puede ser interpretado como la probabilidad de un evento ocurrido, el valor de “0” cuando no han ocurrido cambios, y el valor de “1” cuando éstos se han presentado (Agresti, 1990; Eastman, 2003; Said, 2003; Montgomery, 2004).

3.4 Área de estudio

La investigación se desarrolló en Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, ciudades principales de la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo que presentan un crecimiento urbano alto. Su localización es 20°17'28" de Latitud Norte (LN) y 98°40'14" de Longitud Oeste (LO), 20°04'53" de LN y 98122'07" de LO y 20°39' LN y 98°39' LO para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, respectivamente (Figura 3.1).

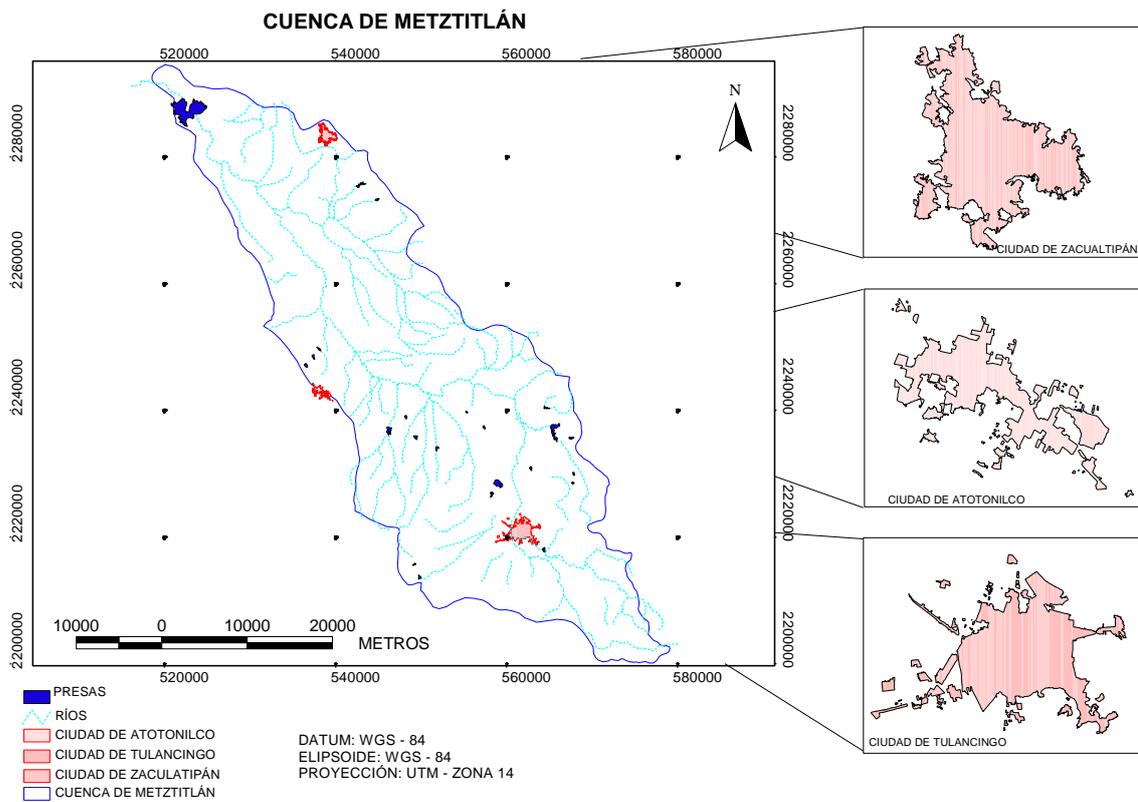


FIGURA 3.1. LOCALIZACIÓN DE LAS CIUDADES BAJO ESTUDIO.

3.5 Metodología

En el presente trabajo se utilizaron fotografías aéreas y ortofotografías en dos periodos. En el primer periodo se emplearon fotografías para Atotonilco y Tulancingo del año de 1977, y para Zacualtipán de 1978 (Cuadro 3.1). Los datos del segundo periodo para la digitalización de la áreas urbanas se obtuvieron de ortofotografías generadas por el INEGI del año de 1995 y editadas en 1996 (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.1. Datos de las fotografías aéreas usadas en el estudio.

<i>Ciudad</i>	<i>Año</i>	<i>Fecha</i>	<i>Escala</i>	<i>Tono</i>	<i>Línea de vuelo</i>
Atotonilco	1977	Mayo	1:35,000	Blanco/Negro	35 A
Tulancingo	1977	Mayo	1:35,000	Blanco/Negro	39
Zacualtipán	1978	Enero	1:35,000	Blanco/Negro	27

Cuadro 3.2. Datos de las ortofotografías

<i>Ciudad</i>	<i>Año</i>	<i>Escala</i>	<i>Coordenada Noreste</i>		<i>Coordenadas Sureste</i>	
			<i>Este</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Norte</i>
Atotonilco	1996	1:75,000	558000	2225550	569798	2211552
Tulancingo	1996	1:75,000	523108	2253100	534886	2239062
Zacualtipán	1996	1:75,000	534600	2294640	546400	2280580

Para el proceso de obtención de los cambios de ocupación del suelo por crecimiento urbano se emplearon los programas de PCI Geomática para la georeferencia, ArcGIS 9 para el proceso de digitalización y el paquete de IDRISI Kilimanjaro para el proceso de detección de cambios y modelación del crecimiento urbano.

La metodología utilizada en este estudio se dividió en dos etapas: (1) La detección del área de cambio y la obtención del modelo de crecimiento. En esta etapa se abordó la georeferencia de las fotografías aéreas, posteriormente la digitalización de las áreas urbanas y finalmente la detección de las áreas de cambio de las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán; y (2) La modelación del área urbana se desarrolló en dos fases: La identificación de las

variables que determinan el modelo de crecimiento del área urbana y posteriormente su modelación.

A continuación se describen los pasos empleados en el desarrollo de la investigación.

3.5.1 Georeferenciación de las fotografías aéreas

La georeferenciación consiste en el cambio de posición que ocupan los píxeles de la imagen mediante el desplazamiento de las celdas de su posición original para minimizar las distorsiones existentes en la misma, con el propósito de darle validez cartográfica (Chuvienco, 2000; Riaño *et al.*, 2000). Este proceso se realiza con la identificación de puntos de control⁷ en la imagen, tales como cruces de caminos o vías férreas, puentes o accidentes geográficos claros y bien definidos que no cambian sus formas rápidamente. La característica a tener en cuenta en la elección *a priori* de un punto de control terrestre (GCP) es la capacidad de “localización inequívoca” con la mayor precisión, tanto en la imagen como en el terreno.

3.5.2 Digitalización de áreas urbanas

La digitalización es un proceso que consiste en convertir a formato digital los elementos (polígonos, líneas y puntos) que aparecen impresos o dibujados en un mapa o fotografía aérea, ya sea automáticamente mediante un scanner o manualmente a través de una digitalizadora para usarlas posteriormente en un equipo digital (INEGI, 1993). La digitalización en este estudio se basó en la interpretación visual de los elementos de tono, color, textura, tamaño, localización, forma, etc. (similar a los empleados en la foto-interpretación) (Chuvienco, 2008). El primer elemento deduce la densidad de la edificación, y el tono indica si la zona cuenta o no con espacios verdes, continuos (manchas uniformes), o discontinuos (tinte salpicado en medio de la edificación). En cuanto a la textura, indica el grado de composición de una determinada sección (Chuvienco, 2000).

⁷ Puntos de control: Cantidad de puntos necesarios para una buena rectificación y dependen del orden del polinomio a usar, del relieve del área y del grado de precisión requerido. Se deben considerar tres aspectos para la elección de los puntos de control; el número, la localización y distribución, éstos dependen de la complejidad del terreno. La distribución debe ser uniforme en toda la imagen. Los errores mayores a un píxel generan grandes diferencias en la interpretación de las características en las imágenes (Chuvienco, 2000; Cook *et al.*, 1996; Liang y Heipke, 1996; Luman *et al.*, 1997).

3.5.3 Detección de áreas de cambio

La detección de cambios tiene como objeto analizar rasgos presentes entre dos o más fechas en un territorio que ha experimentado alguna transformación para evaluar los impactos de un determinado fenómeno, ya sea continuo o temporal (Chuvienco, 2000; Chuvienco, 2008; Lu *et al.*, 2007).

Existen diferentes técnicas para la detección las cuales se emplean dependiendo de la base de datos, del evento de análisis, de la región y de la tecnología disponible (Chuvienco, 1998, Chuvienco, 2000; Coppin *et al.*, 2004; Eastman, 2003; Lu, 2004).

La diferencia de imagen se realiza a través de la resta entre imágenes de dos diferentes épocas, lo cual permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentan un valor cercano a cero, mientras aquellas que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos) (Chuvienco, 2008).

El cruce de tablas consiste en la comparación de las categorías de la primer imagen con la segunda, realizando una tabulación del número de píxel en cada combinación. Este cruce genera una tabla de diferentes medidas de correlación donde Ji-cuadrada y los grados de libertad se usan para conocer la importancia del Índice de Cramer, si Ji-cuadrada es significativa entonces el Índice de Cramer presenta mayor correlación. (Jensen, 1996; Mas, 1999;) El Índice de Cramer es un coeficiente de correlación que oscila entre 0 a 1; el 0 indica que no existe ninguna correlación y el 1 indica que existe una correlación perfecta. Con respecto al Índice de Kappa, es una medida que presenta un valor que va de 0 a 1, y presenta la misma interpretación del Índice de Cramer; es decir, tiene un valor de 0 cuando no hay correlación y adopta el valor de 1 al presentarse mayor correlación. El Índice de Kappa evalúa la discriminación de las categorías de interés pero solo tiene validez si las imágenes comparadas presentan las mismas categorías (Eastman, 2003).

En esta investigación la detección del cambio de uso del suelo se realizó mediante la comparación bi-temporal de las ciudades de dos años diferentes (Atotonilco 1977 y 1996, Tulancingo 1977 y 1996, Zacualtipán 1978 y 1996) a través de la *diferencia de imagen y cruce de tablas*.

3.5.4 Modelación de escenarios del crecimiento urbano

Modelo de probabilidad de desarrollo

Para conocer la movilidad y espacio de urbanización a partir de un modelo de crecimiento urbano en las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán en el periodo de tiempo establecido (1977 y 1996) se desarrolló un modelo probabilístico basado en una regresión logística. La regresión logística es una técnica estadística que estima la relación existente entre una variable dependiente dicotómica y un conjunto de variables independientes (Agresti, 1990; González, 2001; Eastman, 2003; Said, 2003; Montgomery, 2004).

$$\hat{P}(\text{cambio}) = \frac{1}{1 + e^{-(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n)}} \quad (1)$$

Donde:

$\hat{P}(\text{cambio})$ = Probabilidad de que un pixel cambie de uso de suelo por crecimiento urbano en el periodo 1977-1996;

$X_1 + X_2 + \dots + X_n$ = Variable independientes;

$\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n$ = Estimadores de la pendiente de los parámetros;

e = Base del logaritmo natural.

Para la construcción del modelo se definió la unidad básica de análisis de 30 m² por píxel debido a que el modelo digital utilizado presentaba dicha escala. Posteriormente, se identificaron las áreas que se convirtieron en áreas urbanas y se realizó una reclasificación para asignar un valor de “1” a las áreas de crecimiento urbano, y “0” a las áreas que no presentaron cambio. En la fase de detección de cambios, las áreas de cambio se obtuvieron por sustracción de los

dos periodos (1977 y1996), por tanto se generó para cada ciudad una cobertura que contenía valores de “1” y “0”. Estos valores generados representaron la variable dependiente (y) en el modelo.

Posteriormente se obtuvieron los valores de las distancias de cada variable independiente (x_i) de cada píxel. La distancia se tomo del centro de cada celda a los caminos principales, secundarios y al cauce del río, medidos con la distancia eucludiana⁸. Con respecto a la pendiente se obtuvo a través de un modelo digital de elevación. Finalmente, cada variable se representó por un mapa.

Con el modelo de regresión logística construido se obtuvo un mapa de probabilidades de cambios de uso natural a uso urbano para cada ciudad y su área de influencia.

Construcción del escenario futuro de desarrollo en las ciudades bajo estudio

Para cada ciudad se consideró la estimación futura de los habitantes en los próximos 24 años de acuerdo a las estadísticas reportadas por CONAPO (2005) e INEGI (2005). Tomando como base el mapa de probabilidades generado con el modelo logístico, se procedió a distribuir o a “poblar” los nuevos habitantes que se tendrán en los próximos 24 años (hasta el año 2020) iniciando con aquellas celdas que presentaron mayor probabilidad de desarrollo.

⁸ La distancia eucludiana identifica la distancia para cada píxel, es decir, la distancia más corta al centro de desarrollo de 1977 es determinada y el valor es asignado a celda, la cual genera un mapa con diferentes gradientes de cada variable.

3.6 Resultados y discusión

3.6.1 Georeferenciación y digitalización de áreas urbanas

La georeferenciación de las fotografías fue obtenida mediante el método de remuestreo denominado convolución cúbica y utilizando un modelo polinomial de segundo orden (Cuadro 3.3), para las tres fotografías aéreas de las ciudades Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, respectivamente. El error medio cuadrático (RMS) total obtenido fue de 0.29 para Atotonilco, 0.23 para Tulancingo y de 0.30 para Zacualtipán, por lo que en los tres casos se tiene un RMS menor de 0.5 píxel (ver Anexo).

Cuadro 3.3. Parámetros de georeferencia de las fotografías aéreas de las tres ciudades.

Parámetros	Atotonilco 1977	Tulancingo 1977	Zacualtipán 1978
Información de referencia	Fotografía aérea	Fotografía aérea	Fotografía aérea
Método de remuestreo	Cúbico	Cúbico	Cúbico
Orden del polinomio ajustado	2º orden	2º orden	2º orden
Puntos de control	50	72	40
RMS total	0.29	0.23	0.30
Píxel (m)	2.0	2.0	2.0

Con el proceso de digitalización se obtuvo la delimitación de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán (Figura 3.2). El color azul en los mapas representa el área urbana obtenida en 1977, mientras que el rojo representa la superficie urbana en 1996.

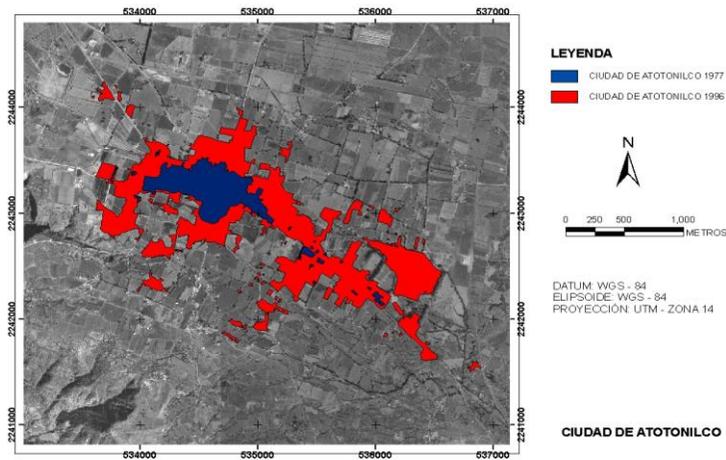
3.6.2 Detección del cambio de uso de suelo urbano

El cambio de uso del suelo urbano para las tres ciudades fue obtenido con la diferencia de imágenes durante el periodo de análisis (1976 y 1996). La Figura 3.3 muestra la superficie de cambio con un color rojo para las ciudades bajo estudio. El mayor crecimiento visual extenso se observa para Zacualtipán siguiéndole Tulancingo y Atotonilco (Figura 3.3). Sin embargo, el porcentaje de cambio fue de 405.4%, 135.3% y 814.9% para las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, respectivamente.

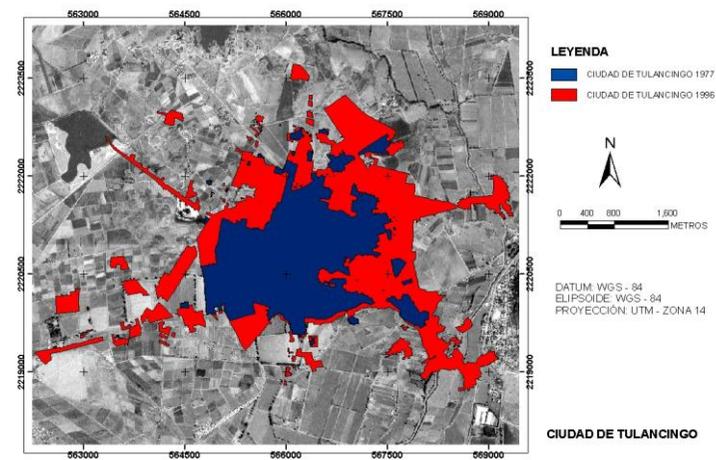
Con la técnica de cruce de tablas y la diferencia de imágenes se obtienen los mismos resultados sobre el crecimiento del área urbana para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán (Figuras 3.3 y 3.4). Sin embargo, la técnica de Cruce de Tablas permite un análisis de las clases proporcionando la superficie estable y dinámica del crecimiento urbano (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Superficie de cambio obtenido con las técnicas de diferencia de imagen y cruce de tablas.

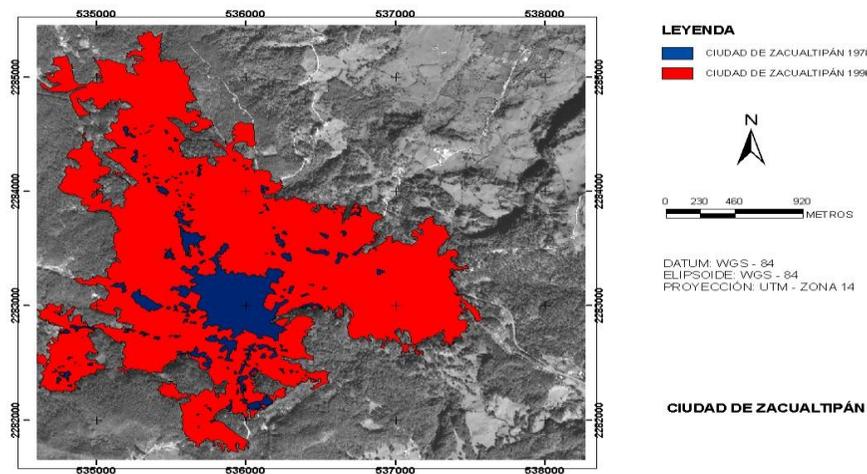
<i>Técnica</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Atotonilco</i>	<i>Tulancingo</i>	<i>Zacualtipán</i>
Diferencia de imagen	Área dinámica cambio	141.57	587.97	393.84
Cruce de mapas	Área dinámica	141.57	587.97	393.84
	Área estable	34.92	434.52	48.33



(A) (Área azul = 34.92 ha; rojo = 176.49 ha).

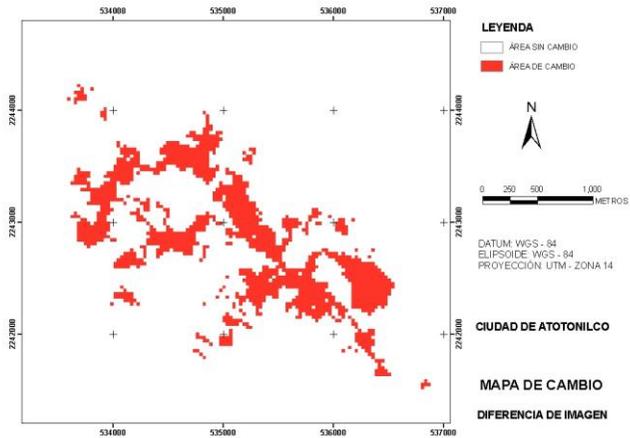


(B) (Área azul = 434.52 ha; rojo = 1022.49 ha).

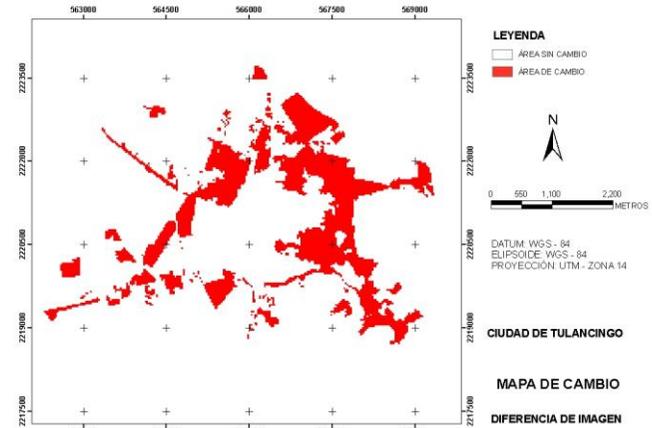


(C) (Área azul = 48.3 ha; rojo = 442.17 ha).

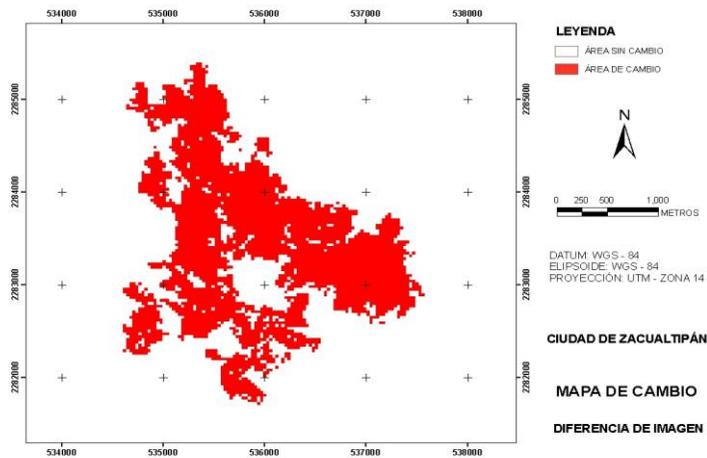
FIGURA 3.2. DIGITALIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).



(A) (Área de cambio = 141.57 ha)

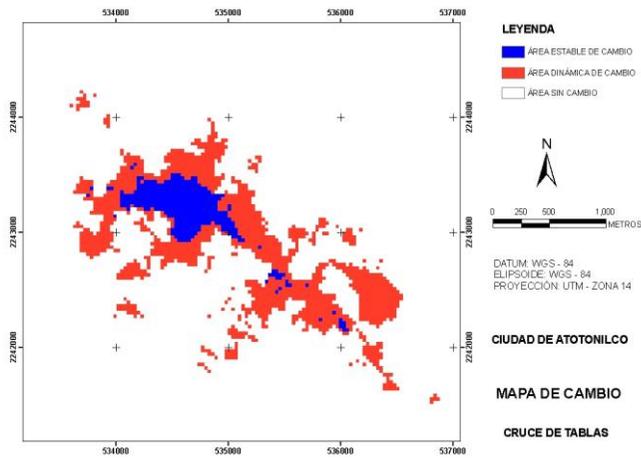


(B) (Área de cambio = 587.97 ha)

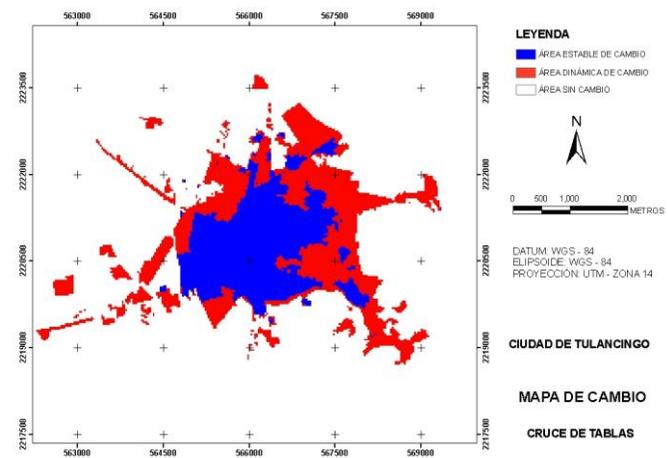


(C) (Área de cambio = 393.84 ha)

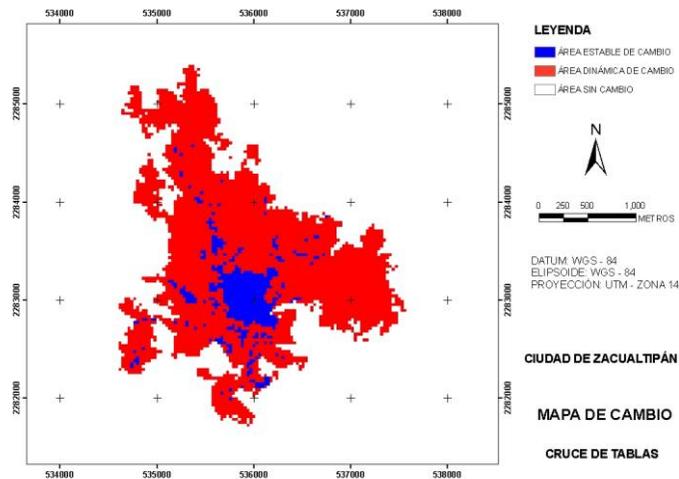
FIGURA 3.3. DETECCIÓN DE CAMBIO PARA LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C) CON LA TÉCNICA DE DIFERENCIA DE IMÁGENES.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.4. DETECCIÓN DE CAMBIO PARA LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C) CON LA TÉCNICA DE CRUCE DE TABLAS.

El procedimiento de *cruce de tablas* comparó las dos clases que presenta cada ciudad para generar el Índice de Cramer e Índice de Kappa; el cruce de tablas permite conocer que la ciudad de Tulancingo presenta mayor correlación en ambos índices comparado con las otras dos ciudades (Cuadro 3.5), ya que expresa la concordancia entre la variable dependiente y las variables independientes; es decir, cuando uno de los valores de una variable se modifica sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de las otras variables.

Cuadro 3.5. Medidas de correlación del Cruce de Tablas para las ciudades bajo estudio.

	Atotonilco	Tulancingo	Zacualtipán
Ji-Cuadrada	1161236.6	5863999.0	256472.8
Grados de libertad	1.0	1.0	1.0
Índice de Cramer	0.4073	0.5708	0.2598
Índice de Kappa	0.2846	0.4915	0.1265

3.6.3 Modelación del crecimiento urbano

En la ejecución del modelo de probabilidad de crecimiento urbano se usaron las variables de distancia a caminos principales y caminos secundarios, la cercanía a ríos y la pendiente del terreno para el diseño del modelo. Todas esas variables independientes se correlacionaron con la variable dependiente.

Variable dependiente

La variable dependiente se obtuvo en la fase de detección de cambio y se usó como la variable dependiente en la elaboración del modelo. Esta variable corresponde a los mapas de diferencias de imagen de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, y representa valores binarios.

Variables independientes

Las variables independientes obtenidas para el modelo de probabilidad de cambio fueron las siguientes:

Distancia a los caminos primarios: Los caminos son un indicador importante de densidad de la población humana y de acceso. En el área del estudio, la mayoría

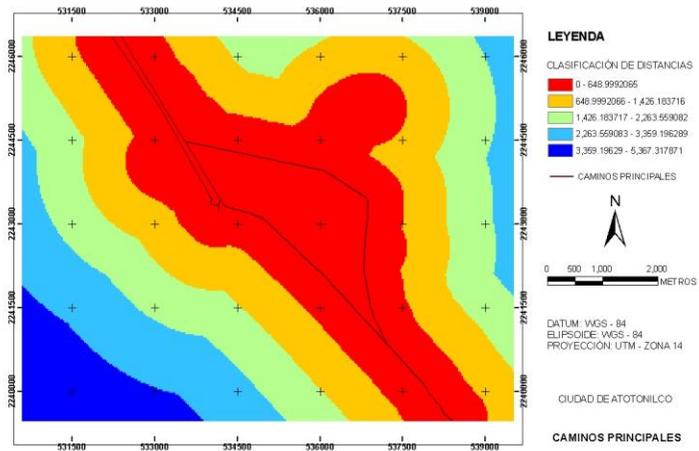
de los caminos se localizó cerca de las áreas urbanas. Los caminos primarios o carreteras siguen un patrón regular típicamente en el área urbana, y es a menudo irregular en las áreas rurales (Figura 3.5).

Distancia a caminos secundarios: La Figura 3.6 muestra la distancia de los caminos secundarios en las tres ciudades de la Cuenca de Metztitlán, éstos presentan una densidad uniforme en las ciudades pero disminuyen conforme se incrementa la distancia a las ciudades. Tulancingo presenta mayor densidad de caminos secundarios en comparación a las otras dos ciudades estudiadas.

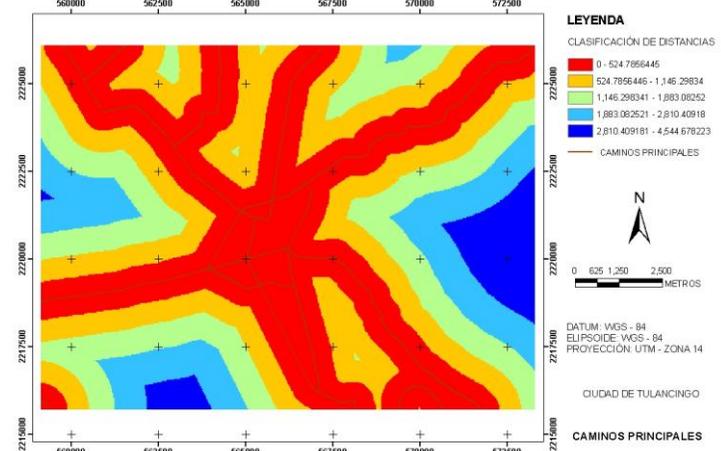
Distancia a ríos: La cercanía a los ríos de las ciudades fue una variable importante debido a que representa una barrera natural de las ciudades o polos de desarrollo y que a veces impide que el crecimiento urbano siga expandiéndose. Lo anterior se observó mejor en la ciudad de Tulancingo, donde la cercanía a el cauce de los ríos ha limitado el crecimiento espacial (Figuras 3.7).

Pendiente de las ciudades: La pendiente se calculó en porcentajes y se observa (Figura 3.8) que Atotonilco y Zacualtipán presentan la superficie del terreno con mayor inclinación en comparación de Tulancingo.

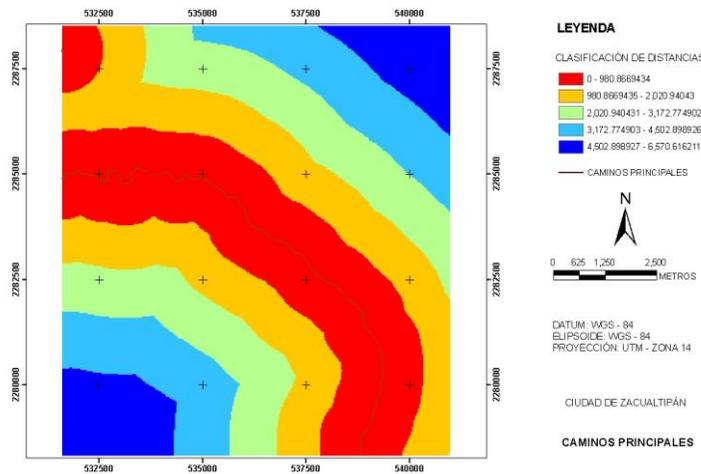
No se probaron variables independientes adicionales en el modelo debido a la disponibilidad de información espacial y recursos.



(A)

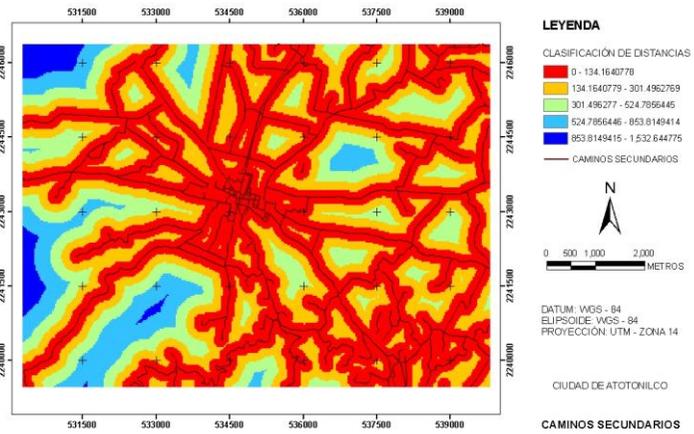


(B)

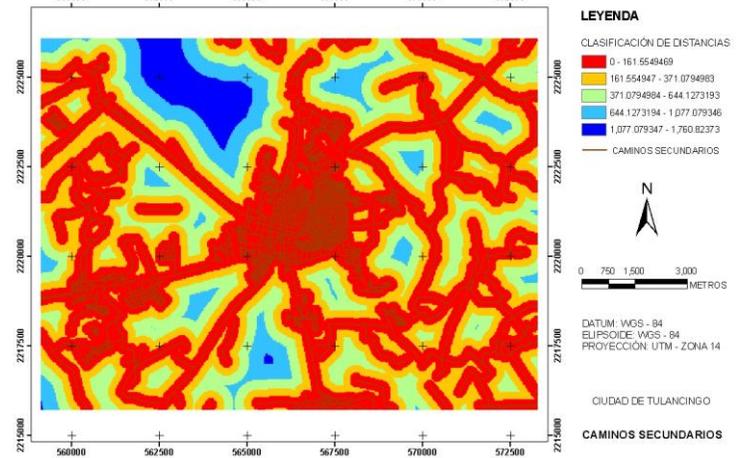


(C)

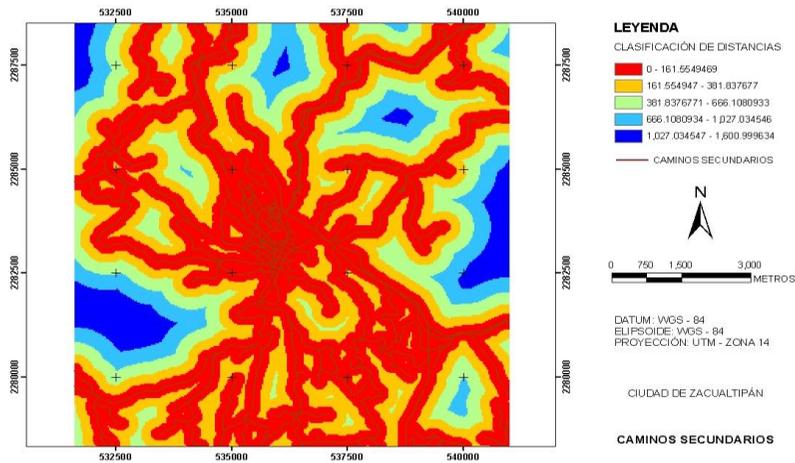
FIGURA 3.5. CAMINOS PRINCIPALES DE LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.6. CAMINOS SECUNDARIOS DE LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).

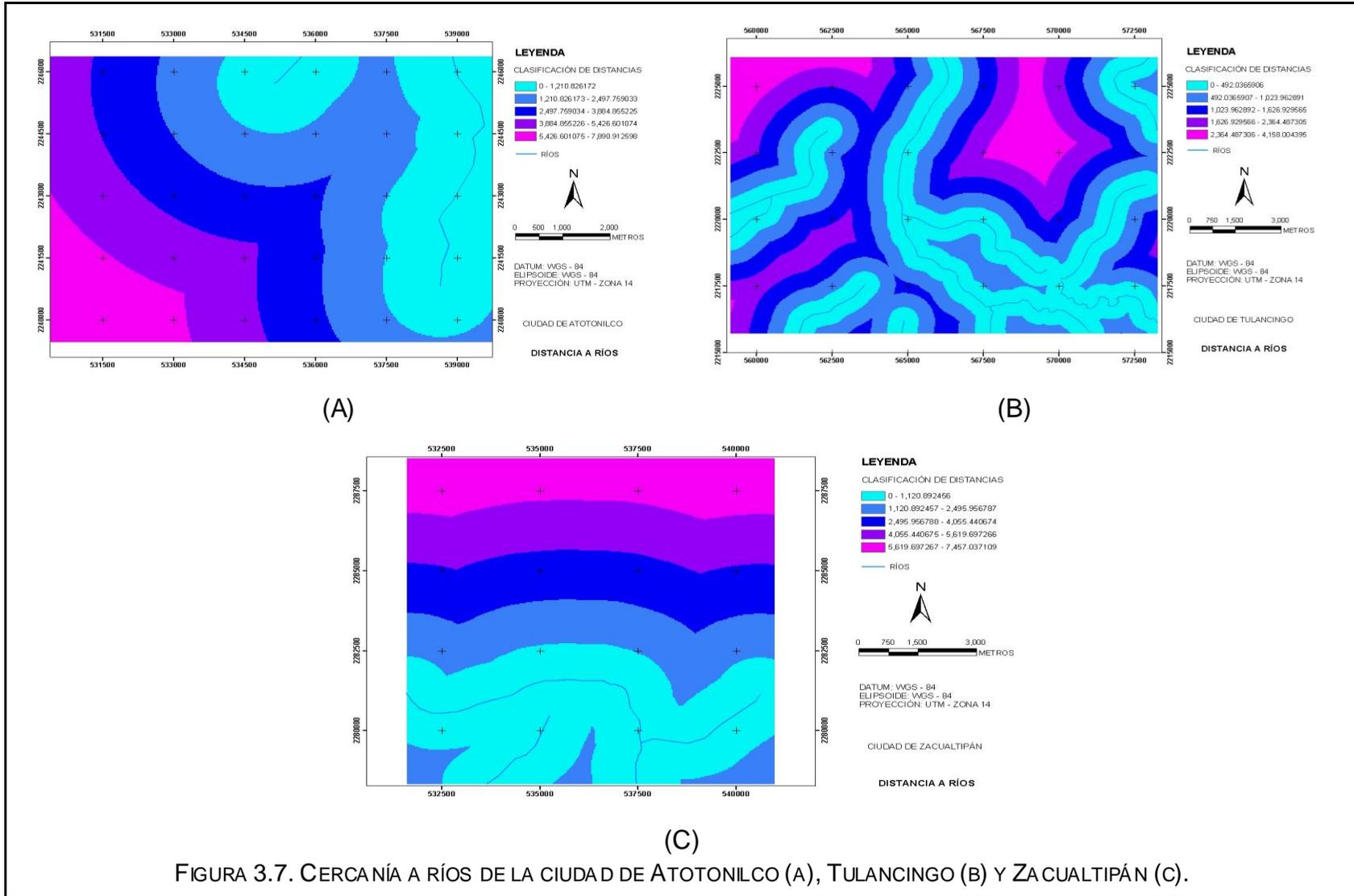


FIGURA 3.7. CERCANÍA A RÍOS DE LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).

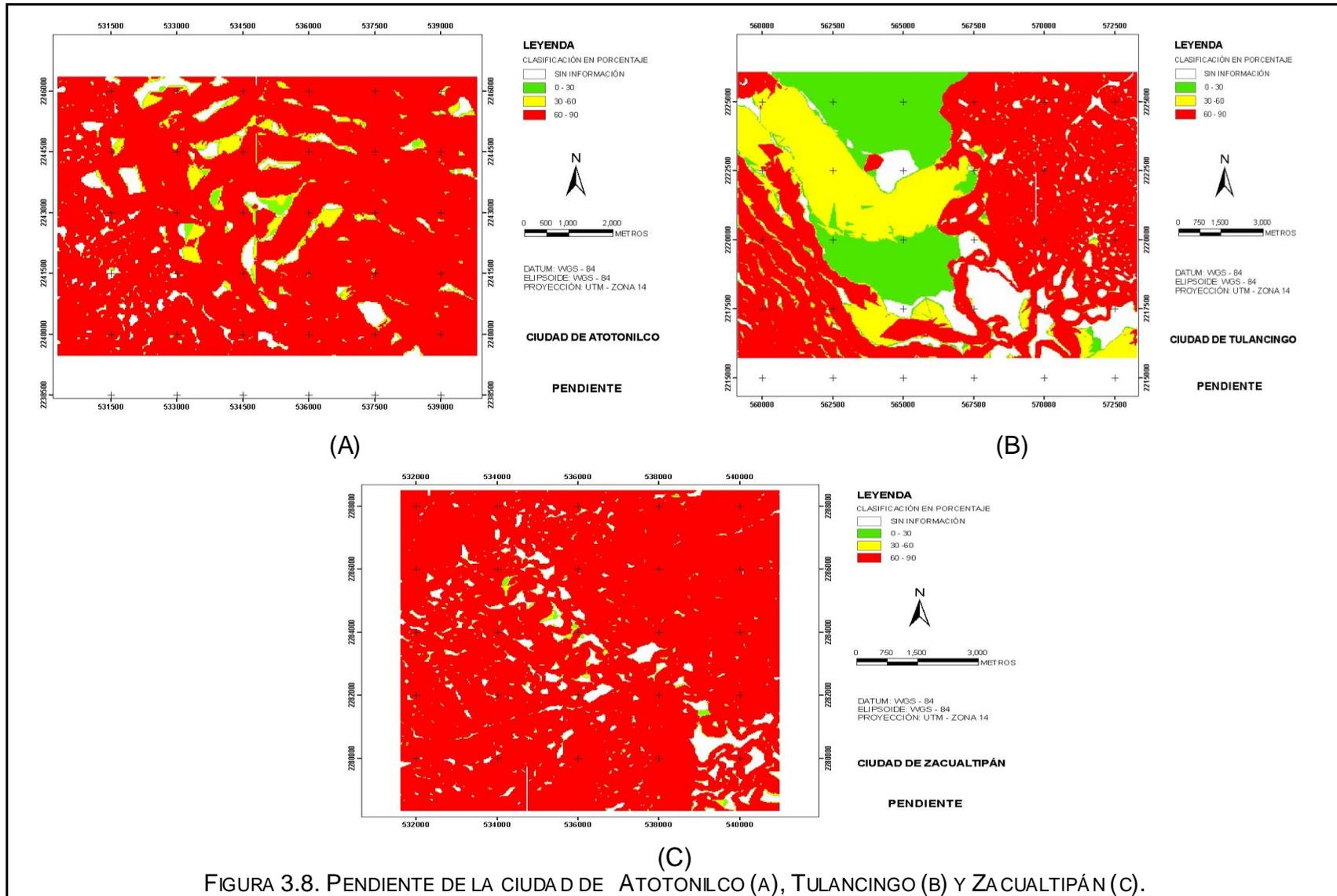


FIGURA 3.8. PENDIENTE DE LA CIUDAD DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).

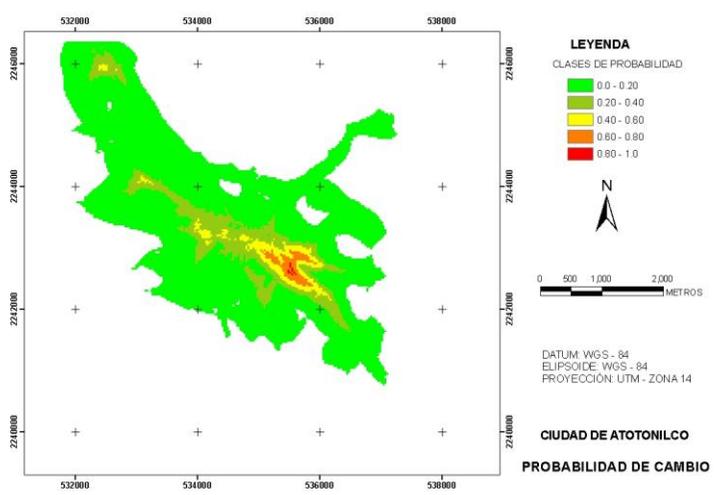
Modelo de probabilidad de desarrollo

El modelo de regresión logística se corrió con el software Idrisi Kilmanjaro donde se ingresaron la variable dependiente y las variables independientes descritas anteriormente. El Cuadro 3.6 muestra el resumen estadístico de las variables dependientes e independientes del modelo de probabilidad de crecimiento urbano para la Ciudad de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán.

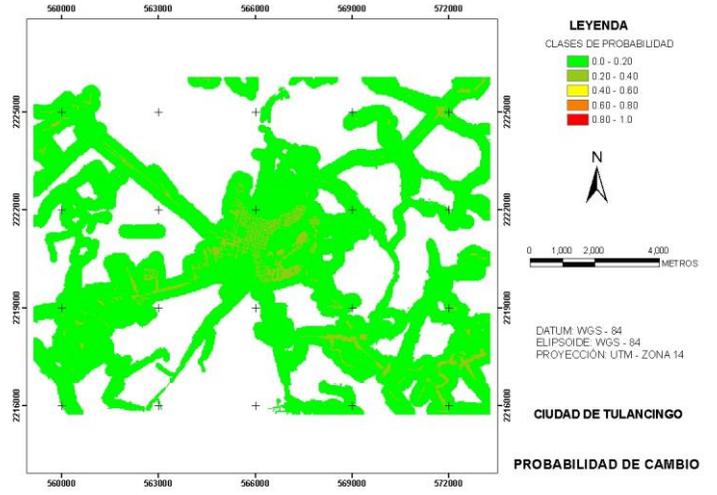
Cuadro 3.6. Datos estadísticos de las variables dependientes e independientes para cada ciudad.

<i>Ciudad</i>	<i>Nombre de la variable</i>	<i>Abreviación</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>
Atotonilco	Intercepto		-9.22396754		
	Área de cambio	Diferencia		0.021507	0.145110
	Distancia a caminos principales (m)	Caminos uno	-0.00687387	1432.332764	1126.535767
	Distancia a caminos secundarios (m)	Caminos dos	-0.00708329	213.557144	215.515625
	Distancia a ríos (m)	Ríos	0.00341850	2677.288330	1871.737671
	Pendiente (%)	Pendiente	0.00626563	72.994469	21.268440
Tulancingo	Intercepto		-0.54895811		
	Área de cambio	Diferencia		0.040003	0.195837
	Distancia a caminos principales (m)	Caminos uno	-0.00103411	961.411682	796.456116
	Distancia a caminos secundarios (m)	Caminos dos	-0.01187755	282.386658	296.961060
	Distancia a ríos (m)	Ríos	-0.00007154	1039.499023	794.216492
	Pendiente (%)	Pendiente	-0.00869290	53.092876	33.174381
Zacualtipán	Intercepto		0.63495660		
	Área de cambio	Diferencia		0.041120	0.198378
	Distancia a caminos principales (m)	Caminos uno	-0.00129715	2154.164795	1533.652710
	Distancia a caminos secundarios (m)	Caminos dos	-0.01410964	307.062927	315.083710
	Distancia a ríos (m)	Ríos	-0.00015814	2770.101807	2195.543457
	Pendiente (%)	Pendiente	-0.00559454	80.011833	22.142244

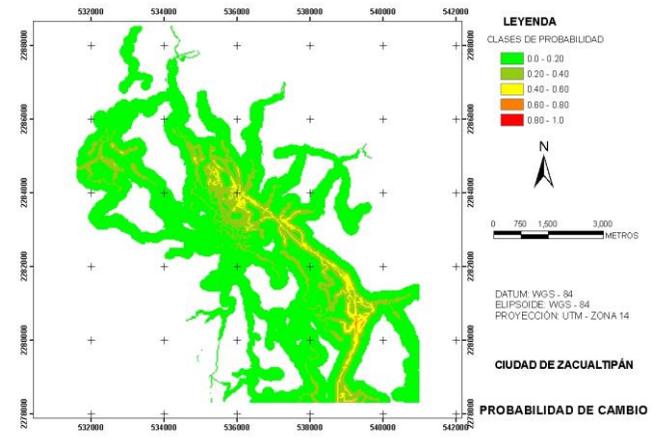
Al correr el modelo dentro del software se generó un mapa de probabilidades de cambio para cada una de las tres ciudades bajo estudio (Figura 3.9). Se observa que conforme incrementa la probabilidad ésta presenta mayor riesgo a ser poblada. Cada modelo expresó la dependencia de las variables para influir en el crecimiento de cada ciudad, y se observó que la cercanía a los caminos principales presenta gran influencia en el incremento de la ciudad, a mayor distancia de los caminos principales y secundarios la probabilidad de crecimiento urbano disminuye.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.9: PROBABILIDADES DE CAMBIO DE ATOTONILCO (A), TULANCINGO (B) Y ZACUALTIPÁN (C).

En el Cuadro 3.7 se observa que el valor de la probabilidad en función de todos los coeficientes es alto, lo que indica que existe una alta correlación entre las variables utilizadas; es decir, la probabilidad de cada modelo en función de la verosimilitud de las variables de cada ciudad es adecuada. Mientras que con respecto al valor de R^2 obtenida para cada uno de los modelos indica que se obtuvo un ajuste adecuado ya que cuando el valor de Pseudo R - cuadrada es mayor al 0.2 se considera un modelo con buen ajuste (Agresti, 1990; Eastman, 2003; Said, 2003; Montgomery, 2004). En tanto que Ji-cuadra presenta la probabilidad estadística de la distribución de las variables y está en función del número de variables independientes que se consideraron en este modelo. Por lo anterior, se considera que el modelo construido para cada ciudad es adecuado y puede ser usado para predecir cambios.

Cuadro 3.7. Resumen estadístico del modelo logístico para cada ciudad.

<i>Ciudad</i>	<i>-2logL0</i>	<i>-2log (Probabilidad)</i>	<i>Pseudo R cuadrado</i>	<i>Bondad de ajuste</i>	<i>Ji-Cuadrada</i>
Atotonilco	15190.6	8197.6	0.4604	16729.6	6993.0
Tulancingo	54857.9	42779.1	0.2202	26860304.0	12078.8
Zacualtipán	36499.4	23584.9	0.3538	42840.0	12914.4

Posteriormente y con datos de la CONAPO (2005) e INEGI (2005) se realizaron estimaciones de la población para los años de 1977 y 1996 ya que los datos oficiales reportados son para cada década. Adicionalmente, se estimaron los datos de la población por ciudad para los años 2010, 2015 y 2020. Finalmente se obtuvo la densidad de la población *per capita* entre 1977 y 1996 y se procedió a estimar la superficie requerida para ubicar a los nuevos residentes de los años 2010, 2015 y 2020. Debido a que en el periodo de análisis de 1977 a 1996 se tuvo una disminución en el número de habitantes por superficie, pero no del área urbana, se procedió a tomar una densidad promedio *per capita* (Cuadro 3.8).

Con base a la población estimada para el año de 2010 se requerirá una superficie de 48.3, 633.1 y 104.1 hectáreas para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán en el 2010. Para 2015 los requerimientos en superficie serán 43.0, 636.1 y 102.6 hectáreas. Sin embargo, para el año 2020 se estimó un crecimiento de 38.9, 631.4 y 1003 hectáreas para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Superficie y densidad de la población para cada ciudad bajo estudio.

Ciudad	Población Total (hab.)					Superficie (ha)					Densidad de la población (Hab./ha)		
	1977	1996	2010	2015	2020	Urbana		Requerida			1977	1996	1977-1996
						1977	1996	2010	2015	2020			
Atotonilco	3,939.0	6009.0	6,276.0	5,595.0	5,054.0	34.9	176.4	48.3	43.0	38.9	112.8	43.0	156.8
Tulancingo	50,361.0	83,685.0	99,296.0	99,758.0	99,022.0	434.5	1022.4	633.1	636.1	631.4	115.9	81.8	170.0
Zacualtipán	7,451.0	14,083.0	17,719.0	17,467.0	17,073.0	48.3	442.1	104.1	102.6	100.3	154.1	31.8	129.8

El porcentaje de cambio para el crecimiento urbano obtenido para el año 2010, 2015 y 2020 para las ciudades bajo estudio se muestra en el Cuadro 3.9.

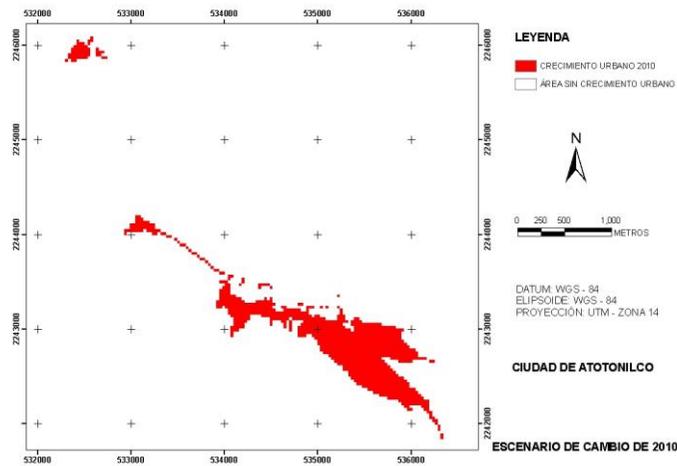
Cuadro 3.9. Porcentaje de cambio de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán.

Año	Porcentaje (%)	Atotonilco Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Tulancingo Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Zacualtipán Superficie (ha)
1977-1996	100.0	141.57	100	587.97	100	393.84
2010	34.1	48.34	107.7	633.17	26.45	104.18
2015	30.4	43.09	108.2	636.12	26.07	102.69
2020	27.5	38.93	107.4	631.43	25.49	100.38

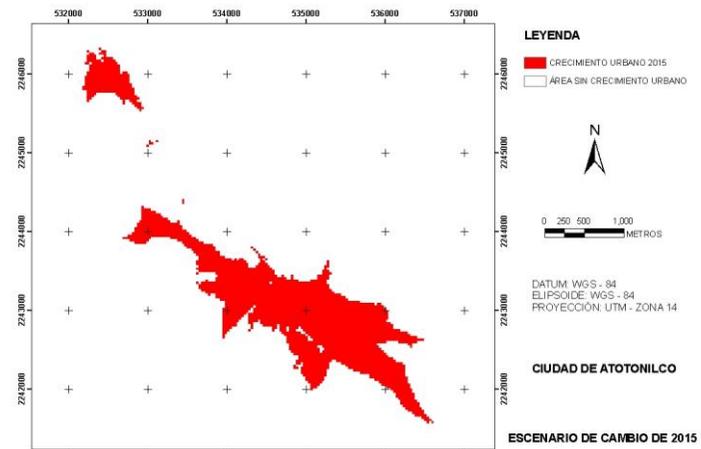
La Ciudad de Atotonilco para el año 2010 presentó un crecimiento de la población y superficie de área urbana, pero para el año 2015 y 2020 se estima que la población va a disminuir. A pesar de eso se espera un crecimiento de la superficie urbana (Figura 3.10).

Con respecto a la Ciudad de Tulancingo se observa en la Figura 3.11, que el incremento de la población en los años 2010 y 2015 influyen en el crecimiento del área urbana, pero para el año 2020 se espera una disminución de la población aunque no precisamente de la superficie urbana.

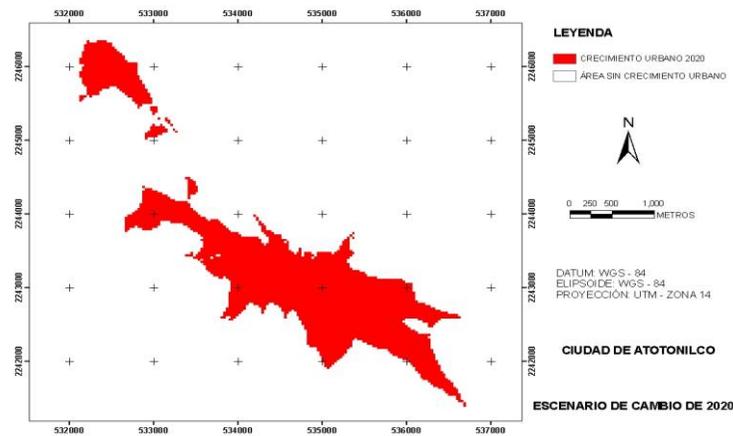
Finalmente, para la Ciudad de Zacualtipán (Figura 3.12) en el año 2010 se espera un incremento de la población y de la superficie urbana, pero para el año 2015 y 2020 se espera que la población disminuya pero no la del área urbana.



(A) 48.34 Ha = 34.1%

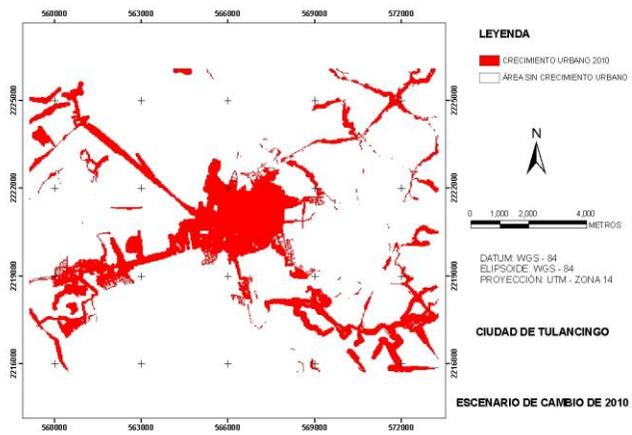


(B) 43.09 Ha = 30.4%

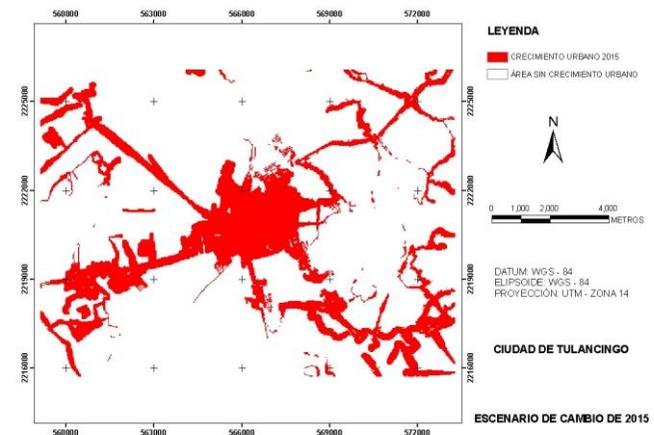


(C) 38.93 Ha = 27.5%

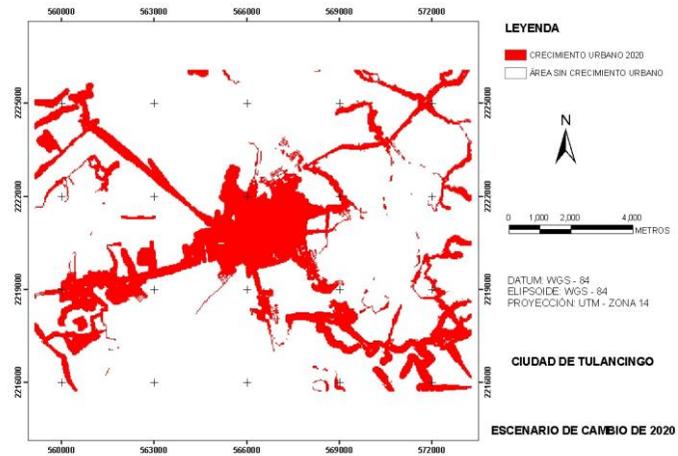
FIGURA 3.10. ESCENARIO DE CAMBIO DE USO DE SUELO URBANO PARA ATOTONILCO EN 2010 (A), 2015 (B) Y 2020 (C).



(A) 633.17 Ha = 101.7%

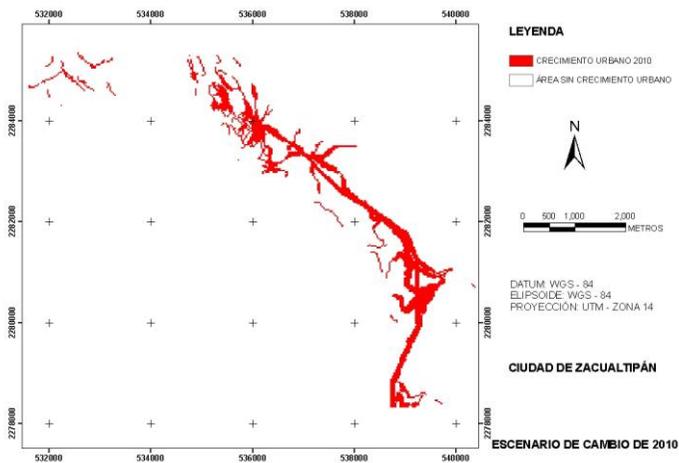


(B) 636.12 Ha = 108.2%

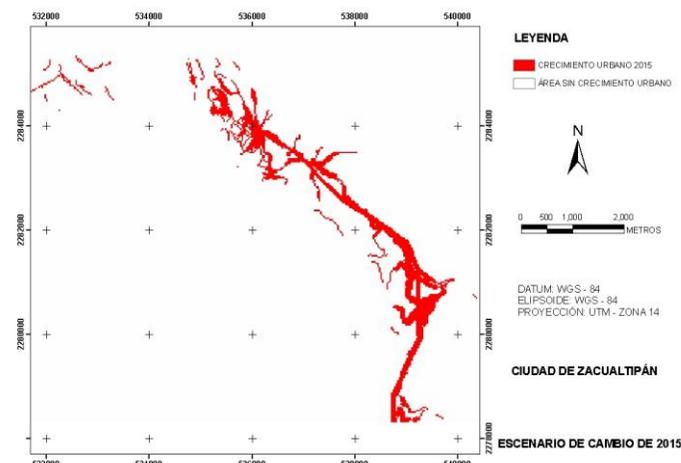


(C) 631.43 Ha = 107.4%

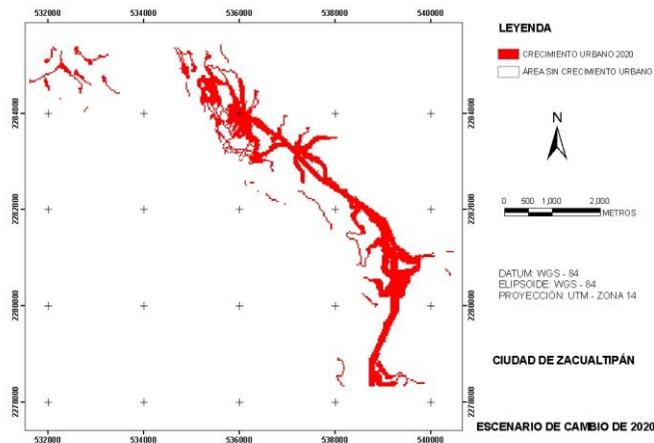
FIGURA 3.11. ESCENARIO DE CAMBIO DE USO DE SUELO URBANO PARA TULANCINGO EN 2010 (A), 2015 (B) Y 2020 (C).



(A) 104.1 ha = 26.4% de cambio



(B) 102.69 ha = 26.07% de cambio



(C) 100.3 ha = 25.49% de cambio

FIGURA 3.12. ESCENARIO DE CAMBIO DE USO DE SUELO URBANO PARA ZACUALTIPÁN EN 2010 (A), 2015 (B) Y 2020 (C).

3.7 Conclusiones

Se estimó el cambio de uso del suelo encontrando un incremento de superficie de 141.5, 587.9 y 393.8 ha y de población de 2,070, 33,323 y 6,633 habitantes para las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, Hidalgo, respectivamente en el periodo de estudio (1977-1996).

El modelo de crecimiento urbano construido con la técnica de regresión logística fue adecuado para predecir el crecimiento espacial futuro en las ciudades bajo estudio. Las variables utilizadas en el modelo construido fueron significativas en la determinación del cambio de uso del suelo en el área de estudio.

3.8 Literatura citada

- Agresti A., 1990. Categorical data analysis. John Wiley & Sons. United States of America. 558 p.
- Alarcón L. J. 2006. Factores, predicción e implicaciones en la asignación de usos del suelo: Revisión y reflexiones. Cuadernos de Investigación Geográfica. Universidad de La Rioja. Madrid, España. 32:147-160.
- Antequera D. N. 2007. La urbanización creciente. Cuaderno de Estudios sociales urbanos. Centro de Documentación e Información Bolivia. Bolivia. 1:22.
- Azócar G., R. Sanhueza y C. Henríquez. 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: El caso de Chillán en Chile Central. Revista Eure. XXIX 87:79-92.
- Borsdorf A. 2003. Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la Ciudad Latinoamericana. Eure. 086 (29): 37-49.
- Cameron, D. Miller, F. Ramsay, I. Nikolaou and G. Clarke. 2000. Temporal measurement of the loss of native pinewood in Scotland through the analysis of orthorectified aerial photographs. Environmental Management. 58.33-43.
- Catalán B, D. Saurí y P. Serra. 2007. Urban sprawl in the Mediterranean: Patterns of growth and change in the Barcelona Metropolitan Region 1993-2000. Landscape and Urban Planning. 11 p.
- Chuvienco E. 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambio. Revista de Teledetección. 10:10.
- Chuvienco E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Alcalá, Madrid. 568 p.
- Chuvienco S. E. y M. P. Martín I. 2004. Nuevas Tecnologías par la estimación del riesgo de incendios forestales. Consejo Superior de Economía y Geografía. Madrid, España. 187 p.
- Chuvienco E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel S. A. 3a Edición. Barcelona, España. 594 p
- Cohen B. 2004 Urban growth in developing countries: A Review of current trends and a caution regarding existing forecasts. World Development. 32(1):23-51.

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y Centro de la Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (Hábitat). 2000. De la urbanización acelerada a la consolidación de los asentamientos humanos en América Latina y el Caribe: El espacio regional. CEPAL. Santiago de Chile. 99 p.
- Consejo Nacional de Población (Conapo). 2005. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/>. Consultado: Noviembre 2009.
- Cook a. E. y J. E. Pinder III. Relative accuracy of rectification coordinates determined from maps global positioning system. *Photogrammetric Engineering & Remote Sens.* 62 (1): 7377
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. and E. Lambin. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Int. J. Remote Sens.* 25(9):1565-1596.
- Eastman R. 2003. Guide to GIS and Image Processing, Kilimanjaro tutorial. Clark Labs. USA. 328 p.
- Galindo L. M., R. Escalante y N. Asuad. 2004. El proceso de urbanización y el crecimiento económico en México. *Estudios Demográficos y Urbanos.* 19 (2):289-312.
- González G. M. J. 2001. Future scenarios of land use in the California Mojave Desert. Tesis de Doctorado. Universidad de Utah. Logan, Utah. 163 p.
- Green K., D. Kempka y L. Lackey. 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land use change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* 60 (3): 331-337.
- Gutiérrez P. J. y M. Gould. 2000. SIG: Sistemas de información geográfica. Editorial Síntesis. Madrid, España. 251 p.
- Henríquez C., G. Azócar, M. Aguayo. 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.
- Herce M. 2005. Urbanización, precios del suelo y modelo territorial: evolución reciente del área metropolitana de Barcelona. Santiago de Chile. *Revista Eure.* XXXI (93):35-51.
- INEGI. 1993. Base de datos geográficos: Modelo de datos vectoriales. INEGI. Aguascalientes, México. 11 p.

- INEGI. 2005. Censo general de Población y Vivienda, 2005. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Hidalgo. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. Consultado: Diciembre 2009.
- Jensen J. R. 1996. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. Prentice Hall. United States of America. 318 p.
- Kumar J. M., P. K. Garg y D. Khare. 2007. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation. 18 p.
- Liang and Heipke 1996. Automatic relative orientation of aerial images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 62 (1):47-55.
- Liu Y., X. Lv, X. Qin., H. Guo., Y. Yu., J. Wang and G. Mao. 2007. An GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. Landscape and Urban Planning. 82:233-246.
- Lu D., P. Mausel, E. Brondizio y E. Moran. 2004. Change Detection Techniques. International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis. 25(12): 2365-2407.
- Luman D. E., C. Stohr y L. Hunt 1997. Digital reproduction of historical aerial photographic prints for preserving a deteriorating archive. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 63(10):1171-1179.
- Mas J. F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. Int. J. Remote Sens. 20(1):139-152.
- Molero M. E., A. L. Grindlay M. y J. J. Asendro R. 2007. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. Geofocus. 7:120-147.
- Montgomery D. C. 2004. Diseño y análisis de experimentos. Editorial Limusa. México, DF. 686 p.
- Otero P. I. 1999. Paisaje, teledetección y sig: conceptos y aplicaciones. Fundación Conde del Valle Salazar. Madrid, España. 436 p.
- Paegelow M., M. T. Camacho y J. Menor. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelación prospectiva del paisaje. GeoFocus. 3:22-44.
- Riaño D, J. Salas y E. Chuvieco. 2000. Corrección atmosférica y topográfica, información multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de

incendios con imágenes Landsat-TM. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*. 222-239.

Romero C. 1993. *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Universidad Textos. Madrid, España. 195 p.

Sandoval V y V. Oyarzun. 2004. Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Revista de Ciencias Forestales*. 11:21.

Said I. G. y G. P. Zarate de L. 2003 *Métodos Estadísticos: un enfoque interdisciplinario*. Editorial Trillas. México, DF. 643 p.

Soria R. J., C. A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke Haller. 1998. *Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales, experiencias en México*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAyT), Colegio de Postgraduados y Sociedad Mexicana de la ciencia del Suelo A. C. 93 p.

Sudhira H. S., T. V. Ramachandra y K. S. Jagadish. 2004. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5:29-39.

Treitz P. and J. Rogan. 2004. Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. *Progress in Planning*. 61:269-279.

USGS Science a Changing World. 1999. *Analysing Land Use Change In Urban Environments*. USGS Fat Sheet. 4 p.

Velázquez A., J. F. Mas, J. R. Días G., R. Mayorga S., P. C: Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*. 62:21-37.

Veldkamp A. y E. F. Lambin. 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 85:1-6.

Villalvazo P. P., J. P. Corona M. y S. García Mora. 2002. Urbano-rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. *Revista de Información y análisis*. 20:8.

Yang X. y C.P. Lo. 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*. 23(9):1775-1798.

CAPITULO IV

CONCLUSIÓN GENERAL Y RECOMENDACIONES

En algunas partes de México como en otros países en desarrollo se están presentando procesos acelerados de cambio de uso del suelo y no existe información confiable y detallada sobre estos procesos que permita una correcta planificación de tales cambios. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar y estimar los cambios espaciales de uso del suelo generado por el crecimiento urbano en la Cuenca de Metztitlán específicamente en las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán.

La población en las tres ciudades bajo estudio ha experimentado un incremento significativo de habitantes en un periodo de 19 años (De 1977 a 1996). En promedio, el incremento fue de 2,070, 33,323 y 7,451 habitantes para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, respectivamente en el periodo mencionado correspondiendo un incremento del área urbana de 80.2%, 57.5% y 89% para cada ciudad. Para los próximos 24 años (considerando como año base a 1996), la población empezará a disminuir gradualmente en las tres ciudades (CONAPO, 2005; INEGI, 2005). Sin embargo, la superficie del área urbana seguirá incrementando.

Este estudio representa una contribución al conocimiento del uso del suelo en el área de estudio a través de la creación de un modelo que permite evaluar la influencia del crecimiento urbano futuro. Los modelos de cambio de uso de suelo se han transformado en una herramienta indispensable para el análisis espacial orientado para explorar los diferentes mecanismos que rigen los cambios de uso de suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a dicho cambio, lo cual permite evaluar alternativas de política y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Azócar *et al.*, 2003; Borsdof, 2003; Henríquez *et al.*, 2006 y Azócar *et al.*, 2008).

El modelo de crecimiento urbano construido estima la probabilidad de cambio de uso natural a uso urbano tomando como base el crecimiento espacial del área urbana en un periodo de 19 años en la Cuenca de Metztitlán. Posteriormente, la proyección o tendencia futura del crecimiento para las tres ciudades bajo estudio se realizó tomando como base la densidad poblacional promedio tenido durante el periodo de 1976 a 1996 y la estimación del crecimiento poblacional de cada ciudad para los años 2010, 2015 y 2020. Con esta información, los nuevos habitantes fueron distribuidos sobre el mapa de probabilidades obtenido con el modelo de crecimiento urbano construido.

La tesis se desarrolló en tres capítulos, en el primero se realiza una descripción de la situación ambiental, social y económica de cada ciudad en un contexto regional, sus características físicas, ambientales y socioeconómicas de los municipios en los cuales se localizan las ciudades bajo estudio. La ciudad de Atotonilco, se ubica en el municipio de Atotonilco el grande, Tulancingo en el municipio de Tulancingo de Bravo y la ciudad de Zacualtipán pertenece al municipio de Zacualtipán de Ángeles.

En el segundo Capítulo se describió y analizaron algunos métodos de detección de cambios en el uso del suelo originado por el crecimiento urbano, e implementados a nivel internacional, esto con la finalidad de mostrar sus ventajas y desventajas que determina el uso de cada técnica, así como exponer aquellos métodos que proporcionan resultados favorables fundamentados en la información geográfica y en los sensores remotos. El conocimiento, la capacitación y habilidad del analista sobre los métodos de detección de cambios existentes y de los datos de la imagen utilizada, así como de las características del área de estudio son aspectos que influyen en la selección del o los métodos a utilizar para analizar la dinámica del cambio de uso del suelo. Por tanto, el método a seleccionar dependerá de las condiciones existentes del lugar y su entorno, así como de los recursos disponibles y sobre todo del o los objetivos a alcanzar.

Por otro lado, el Capítulo III se enfoca en la detección y modelación del cambio de uso de suelo generado por el incremento de la población en las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán de la Cuenca de Metztitlán, esto con la finalidad de conocer y estimar el área de expansión urbana en los próximos años, contemplando el año 2020 para fines de planificación urbana.

El modelo de crecimiento urbano correlaciona el área urbana detectada en el periodo bajo estudio (1977-1996) con algunas variables que condicionan dicho crecimiento, tales como caminos principales, caminos secundarios, cercanía a ríos y la pendiente del terreno. Aunque todas las variables utilizadas fueron significativas, los resultados observados en los mapas indicaron que las áreas más cercanas a los caminos primarios, en comparación a aquellas áreas cercanas a los caminos secundarios, presentaron mayor probabilidad de cambio de uso.

La importancia del presente estudio se centra en la creación de escenarios de crecimiento urbano donde contempla la misma tendencia de crecimiento de la población y permite ser la base de la orientación del crecimiento urbano y de la planificación urbana. Debido a que es necesario contar con medidas necesarias y organizativas en el incremento de las zonas urbanas, se tomó como base a las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán, por ser de gran importancia en el crecimiento urbano en la Cuenca de Metztitlán, Hidalgo.

Es necesario realizar varios esfuerzos y estudios para ordenar el crecimiento de la población, pero aun falta mucho trabajo de planificación, por lo que no se tiene nada concreto y ejecutable en las ciudades, debido principalmente a que los municipios cumplen con realizar planes de desarrollo de sus áreas de influencias, pero debido a factores políticos, económicos y sociales, en muchas ocasiones no se construye un plan de ordenamiento territorial.

La apropiada planificación del uso del suelo en cada ciudad dependerá del rápido crecimiento que se tenga y la respuesta de las autoridades encargadas de la

planificación, por lo que es necesario contar con un soporte normativo y técnico, que se exprese en el cumplimiento y respeto de políticas de desarrollo urbano sustentable. Mientras no exista una congruencia efectiva entre la voluntad política de desarrollar una ciudad organizada y sustentable, con hechos concretos por parte de las autoridades o actores públicos y privados, todo el esfuerzo realizado independientemente por Ciudad será en vano.

La generación de estrategias de desarrollo urbano sustentable que deben llevar a cabo los actores públicos, específicamente los tomadores de decisión y profesionales encargados de planificar la ciudad, se advertiría sustancialmente perfeccionada si se considerara factores ambientales, sociales y económicos a nivel local, regional y nacional.

El uso de modelos predictivos para la generación de escenarios futuros de cambio de uso del suelo es una herramienta muy útil en la planificación urbana, y complementado con el uso de indicadores de sustentabilidad, pueden ayudar sustancialmente a minimizar los impactos ambientales experimentado en los últimos años por dichos crecimientos urbanos.

4.1 Conclusiones

En el primer capítulo se obtuvo un análisis detallado de los municipios, lo cual determinó que el crecimiento de la población, y con base a las características ambientales y socioeconómicas, las ciudades de Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán se encuentran en un proceso de crecimiento gradual.

En el segundo capítulo con el análisis de las técnicas empleadas para la detección de cambio de uso de suelo por crecimiento urbano se concluyó que no existe una técnica óptima para el cambio de uso de suelo por crecimiento urbano ya que depende de las características del área de estudio, del aspecto a evaluar, de la calidad de la información y del costo de implementación, incluyendo el objetivo del estudio.

El tercer capítulo en el modelo de crecimiento obtenido presentó grandes capacidades para predecir el crecimiento urbano espacial, a pesar de que es necesario realizar una validación del modelo con algunos expertos o confrontarlo con la realidad. Estadísticamente el modelo de crecimiento presentó gran correlación entre la variable dependiente e independientes para predecir la probabilidad de crecimiento.

Los patrones espaciales, ambientales y socioeconómicos son de suma importancia en el incremento de la urbanización de cada ciudad. El modelo del crecimiento urbano de cada ciudad definió claramente la probabilidad de cambio de las áreas aledañas al área de crecimiento, con gran potencial para emplearse en la generación de datos e información para el estudio de la urbanización y tendencia del crecimiento urbano.

4.2 Recomendaciones

El modelo de crecimiento de probabilidad de urbanización obtenido para Atotonilco, Tulancingo y Zacualtipán representa una herramienta de planificación del desarrollo, pero aun se requiere validarla y construir diferentes escenarios de crecimiento con la finalidad de crear y proponer un abanico de posibilidades de política del crecimiento o decremento de la población en el área de estudio y sus implicaciones.

Es necesario regular el uso de la tierra y con ello el manejo de los recursos naturales, humanos y económicos que intervienen en el proceso del crecimiento urbano en las ciudades, debido a los problemas que trae consigo el incremento del área urbano debido a que cada vez más se requieren mayores espacios de vivienda, áreas recreativas, áreas de museos, centros comerciales, así como cubrir los requerimientos de agua, alimentos, luz, entre otros.

Se requiere que las políticas que rigen el crecimiento urbano sean congruentes con las características ambientales, socioeconómicas, a las costumbres y tradiciones de cada ciudad. Consecuentemente, es importante que la planificación sea un proceso participativo incluyente.

Es necesario que especialistas en los estudios de cambios de uso urbano elaboren instrumentos de planificación urbana, con la finalidad de proporcionar soluciones oportunas y adecuadas a los diferentes problemas que se asocian a los procesos de urbanización actuales.

4.3 Literatura citada

- Azócar G., c. Henríquez, C. Valenzuela y H. Romero. 2008. Tendencias sociodemográficas y segregación socioespacial en Los Ángeles, Chile. *Revista Geográfica Norte Grande*. 41.103-128.
- Azócar G., R. Sanhueza y C. Henríquez. 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: El caso de Chillán en Chile Central. *Revista Eure*. XXIX 87:79-92.
- Borsdorf A. 2003. Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la Ciudad Latinoamericana. *Eure*. 086 (29): 37-49.
- Consejo Nacional de Población (Conapo). 2005. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/>. Consultado: Noviembre 2009.
- Henríquez C., G. Azócar, y M. Aguayo. 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.
- INEGI. 2005. Censo general de Población y Vivienda, 2005. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Hidalgo. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. Consultado: Diciembre 2009.

ANEXO

Anexo 1. Puntos de control para la georeferencia de las fotografías aéreas en las ciudades bajo estudio.

