



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**Análisis del riesgo de inundación en Ecatepec de
Morelos y su relación con el cambio de uso de
suelo, empleando SIG.**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

Moreno Leyva Mireya



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Montoya Ayala Raymundo**

Los Reyes Iztacala, Estado de México, 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Académicos

Aprovecho este espacio para agradecer a la Universidad y a los docentes que fueron parte de mi formación académica durante los últimos años. Así mismo agradezco al Dr. Raymundo por aceptarme como tesista y por sus valiosas sugerencias para pulir la investigación. A los sinodales: Mtra. Liliana Rubio, Mtra. Ana Lilia Muñoz, Dr. Rodolfo García, por su tiempo, sus atinadas críticas y correcciones en el proceso de revisión.

Una mención especial merece la maestra Mónica Chico, parte fundamental del trabajo, por sus críticas y aportaciones durante la realización del mismo, gracias además por compartir su conocimiento, tiempo, por ser una excelente bióloga y maestra de SIG.

Personales

Agadezco profundamente a las personas que más amo en el mundo: a mis papás, Norma y Francisco, por su fortaleza, comprensión, por la vida, por sus enseñanzas, por su amor, su esfuerzo, apoyo incondicional y sobre todo por aguantarme todos estos años, espero que la vida alcance para agradecer y devolvérles un poquito de todo lo que han hecho por mí. A mis hermanos Elizabeth y Omar, gracias por formar parte de mi vida, pase lo que pase cuentan conmigo siempre.

A mis amigos: Alberto, Liliana y Marlenne, por tantas vivencias, por su apoyo en buenos y malos momentos durante la carrera, los quiero mucho, a Gerardo y Enrique (Guillo), por acompañarme a tomar algunos geoposicionamientos, a Perla y Lore, porque a pesar de que ya no nos vemos tan seguido las llevo en el corazón, a Diego por sacarme el libro de Exequiel Ezcurra de la biblio. En fin, a todos aquellos que formaron parte de esta etapa, compañeros y amigos, grax.

Índice de contenido

1.0ntroducción.....	1
2.0 Marco teórico.....	3
2.1 Cartografía automatizada.....	3
2.2 Los Sistemas de Información Geográfica.....	4
2.2.1 Origen	4
2.2.2 Definiciones de SIG.....	5
2.2.3 Elementos de un SIG	5
2.2.4 Formatos para la representación de datos	6
2.2.5 Álgebra de mapas	9
2.3 Aplicaciones de los SIG	11
2.3.1 Ordenamiento ecológico y territorial OET: Definición.....	11
2.3.2 Fases del OET	11
2.3.3 Análisis espacial y modelos.....	12
2.3.4 Evaluación de riesgos	13
2.4 Las inundaciones, definición, impacto y clasificación	14
2.4.1 Inundaciones en cuencas endorréicas, la cuenca del Valle de México.....	15
2.5 Descripción de variables ambientales contempladas en el SIGMA y su implicación en el riesgo de inundación.....	17
2.5.1 Elevación y pendiente	17
2.5.2 Geología.....	18
2.5.3 Edafología.....	19
2.5.4 Hidrología superficial y capacidad de microcuencas.....	20
2.5.5 Usos de suelo y vegetación.....	20
2.5.6 Aspectos climáticos	21
2.6 Gestión de RSU (Residuos sólidos urbanos).....	21
2.6.1 Contexto nacional de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (GRSU).....	22
2.7 Teledetección	23
2.7.1 Principios físicos de Teledetección.....	25
2.7.2 Resoluciones de un sensor para teledetección: espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular.....	26
2.7.3 Sensores satelitales Landsat (bandas y composiciones para coberturas).....	27
2.8 Percepción remota y SIG	28

3.0 Antecedentes	29
3.1 Sistema de información Geográfica Medio Ambiental SIGMA.....	29
3.2 Evaluación de cambio de usos de suelo y vegetación	29
3.3 Zonificación del riesgo de inundación	31
3.4 Identificación de puntos de conflicto actualmente empleados como vertederos clandestinos en el municipio y su relación espacial con el riesgo de inundación.....	32
4.0 Justificación.....	32
5.0 Objetivos	33
6.0 Área de estudio	34
6.1 Etimología del nombre	34
6.2 Extensión territorial y localización	34
6.3 Características biofísicas	34
6.4 Historia	36
6.4.1. Época prehispánica.....	36
6.4.2. Época colonial.....	37
6.4.3. Época independiente y revolución	37
6.4.4. Época actual.....	38
7.0 Materiales y métodos	39
7.1 Caracterización socio-ambiental y elaboración de mapas temáticos (SIGMA).....	39
7.1.1 Subsistema biofísico.....	39
7.1.2 Subsistema climático.....	40
7.1.3 Subsistema socioeconómico	41
7.2 Evaluación del cambio de uso de suelo y coberturas vegetales.....	41
7.3 Zonificación del riesgo de inundación	46
7.4 Identificación de zonas de conflicto empleadas como vertederos clandestinos.....	50
8.0 Resultados y discusión.....	51
8.1 Descripción de la caracterización socio-ambiental, Sistema de Información Geográfica Medio Ambiental (SIGMA)	51
8.1.1 Subsistema biofísico.....	51
8.1.2 Subsistema climático.....	62
8.1.3 Subsistema socioeconómico	66
8.1.4 Discusión: relación de las características socioambientales municipales con el riesgo de inundación	77
8.2. Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación en Ecatepec de Morelos.....	79

8.2.1 Descripción de usos de suelo y vegetación municipal en 1996, 2007 y 2016.....	79
8.2.2 Validación de las clasificaciones.....	80
8.2.3 Descripción de errores de omisión y comisión en las clasificaciones supervisadas ...	86
8.3 Dinámica de cambio de usos de suelo y vegetación	87
8.3.1 Descripción de cambios de 1996 a 2007	87
8.3.2 Descripción de cambios de 2007 a 2016.....	91
8.3.3 Descripción de cambios en el período completo de análisis (1996-2016).....	95
8.3.4 Discusión de la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación en el periodo completo de análisis, de 1996 a 2016	99
8.4 Zonificación del riesgo de inundación y su relación con el uso de suelo municipal (1996, 2007 y 2016).....	102
8.4.1 Descripción de la zonificación del riesgo	102
8.4.2 Discusión.....	105
8.5 Descripción y discusión de la identificación de zonas con vertederos clandestinos a cielo abierto y su relación espacial con el riesgo de inundación	115
9.0 Conclusiones.....	117
10.0 Consideraciones finales.....	118
11.0 Literatura citada.....	119

Índice de cuadros

Cuadro 1. Evolución histórica de los Sistemas de Información Geográfica.....	4
Cuadro 2. Espectros electromagnéticos captados por los sensores.....	26
Cuadro 3. Resolución espectral de Landsat 5.....	27
Cuadro 4. Resolución espectral de Landsat 8.....	28
Cuadro 5. Composición espectral de las imágenes empleadas para la clasificación supervisada.....	42
Cuadro 6. Valoración del coeficiente Kappa.....	45
Cuadro 7. Clasificación de variables ambientales y sociales para la zonificación del riesgo de inundación.....	47
Cuadro 8. Número total y género de habitantes con alguna discapacidad a nivel municipal en 2010.....	67
Cuadro 9. Comparación de superficies ocupadas por cada uso de suelo y vegetación en 1996, 2007 y 2016.....	79
Cuadro 10. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de 1996.....	81
Cuadro 11. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de 2007.....	82

Cuadro 12. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de 2016.....	83
Cuadro 13. Matriz de transición de uso de suelo de 1996 a 2007.....	90
Cuadro 14. Matriz de transición de uso de suelo de 2007 a 2016.....	94
Cuadro 15. Matriz de transición de uso de suelo de 1996 a 2016.....	98

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de representación gráfica de información vectorial.....	7
Figura 2. Modelo de representación triangulada TIN.....	7
Figura 3. Modelo de representación ráster.....	8
Figura 4. Ubicación de un píxel en una matriz ráster.....	8
Figura 5. Comparación de resoluciones espaciales.....	9
Figura 6. Comparación entre modelos de representación ráster y vectorial	9
Figura 7. Reclasificación de una capa ráster.....	10
Figura 8. Esquema de ciclo hidrológico.....	15
Figura 9. Inundación de cuenca endorréica.....	16
Figura 10. Delimitación de la Cuenca del Valle de México.....	17
Figura 11. Relieve del Estado de México.....	18
Figura 12. Ciclo de las rocas.....	19
Figura 13. Elementos de un sistema de Teledetección.....	24
Figura 14. Esquema de una onda electromagnética.....	25
Figura 15. Resolución temporal de un sensor.....	27
Figura 16. Resumen histórico de Ecatepec.....	36
Figura 17. Escudo de Ecatepec.....	38
Figura 18. Glifo de Ecatepec.....	39
Figura 19. Elementos en la matriz de confusión para calcular coeficiente Kappa.....	44
Figura 20. Elementos de la matriz de transición.....	45
Figura 21. Propuesta de modelo espacial para zonificar el riesgo de inundación.....	46
Figura 22. Explicación de integración de variables.....	48
Figura 23. Integración de variables de la matriz A a la FF.....	49
Figura 24. Integración de variables para obtener el riesgo total de inundación.....	50

Figura 25. Imágenes de algunos puntos usados como basureros en Ecatepec, tomadas en campo.....	50
Figura 26. Tipos de rocas presentes en el municipio.....	52
Figura 27. Tipos de suelos presentes en el municipio.....	53
Figura 28. Tipos de usos de suelo y vegetación municipales.....	55
Figura 29. Comparación de superficies para cada uso de suelo y vegetación en 1996, 2007 y 2016.....	80
Figura 30. Principales cambios de uso de suelo y vegetación de 1996 a 2007.....	91
Figura 31. Principales cambios de uso de suelo y vegetación de 2007 a 2016.....	95
Figura 32. Principales cambios de uso de suelo y vegetación de 1996 a 2016.....	98
Figura 33. Comparación de superficies inundables en 1996, 2007 y 2016.....	105

Índice de mapas

Mapa 1. Mapa del área de estudio.....	35
---------------------------------------	----

Anexo cartográfico 1. Subsistema biofísico

Mapa 2. Elevación del terreno en Ecatepec de Morelos.....	56
Mapa 3. Inclinación del terreno en Ecatepec de Morelos.....	57
Mapa 4. Tipos de rocas presentes en Ecatepec de Morelos.....	58
Mapa 5. Unidades de suelo presentes en Ecatepec de Morelos.....	59
Mapa 6. Hidrología superficial en Ecatepec de Morelos.....	60
Mapa 7. Usos de suelo y vegetación (2016).....	61

Anexo cartográfico 2. Subsistema climático

Mapa 8. Temperatura media anual en Ecatepec de Morelos.....	63
Mapa 9 . Precipitación media anual en Ecatepec de Morelos.....	64
Mapa 10. Evaporación media anual en Ecatepec de Morelos.....	65

Anexo cartográfico 3. Subsistema socioeconómico

Mapa 11. Población por localidad en Ecatepec de Morelos.....	69
Mapa 12. Población de 0 a 14 años de edad en Ecatepec de Morelos.....	70
Mapa 13. Población con discapacidad física en Ecatepec de Morelos.....	71
Mapa 14. Población mayor de 65 años Ecatepec de Morelos.....	72
Mapa 15. Población económicamente activa PEA en Ecatepec de Morelos.....	73

Mapa 16. Grado de marginación local en Ecatepec de Morelos.....	74
Mapa 17. Grado de rezago local en Ecatepec de Morelos.....	75
Mapa 18. Población no afiliada a servicios de salud pública en Ecatepec de Morelos.....	76
Anexo cartográfico 4. Clasificación supervisada de usos de suelo y vegetación	
Mapa 19. Usos de suelo y vegetación en Ecatepec de Morelos(1996).....	84
Mapa 20. Usos de suelo y vegetación en Ecatepec de Morelos(2007).....	85
Anexo cartográfico 5. Riesgo de inundación	
Mapa 21. Riesgo ambiental de inundación en Ecatepec (2016).....	110
Mapa 22. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación (1996)	111
Mapa 23. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación (2007).....	112
Mapa 24. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación (2016).....	113
Mapa 25. Relación espacial entre riesgo de inundación y resiliencia social (2016).....	114
Anexo cartográfico 6. Vertido público de desechos	
Mapa 26. Zonas con basureros a cielo abierto y su relación con el riesgo de inundación	116

Resumen

Palabras clave: *SIGMA, riesgo, vulnerabilidad, inundación, residuos, cambio, uso de suelo.*

Las inundaciones causan pérdidas humanas, económicas, problemas sanitarios, ambientales, y son frecuentes en zonas urbanas a consecuencia de la inadecuada planificación territorial, la creciente demanda de espacios para uso habitacional y su establecimiento en áreas que por sus características biofísicas son potencialmente inundables, tal es el caso de Ecatepec de Morelos, que yace en la planicie lacustre del antiguo Lago de Texcoco, actualmente drenado de manera artificial. El drenaje municipal se ve dañado por la subsidencia del suelo y el mal manejo de residuos sólidos, lo que aumenta el riesgo de inundación, y merma la calidad de vida de la población, por lo que es indispensable zonificar el riesgo como primera aproximación para facilitar la toma de decisiones, mejorar la planificación urbana, prevenir y mitigar daños. Dicho lo anterior, el presente documento expone un análisis del riesgo de inundación en Ecatepec y su relación con el cambio de uso de suelo.

El SIGMA municipal muestra predominancia de suelos anegables, Solonchak (60.68%) y Feozem (26.38%), rocas de drenaje deficiente, aluviales 38.94% y lacustres 34.86%, que los núcleos urbanos están aledaños a hidrología, y hay alta marginación social. Los sectores menos resilientes a desastre son, 26.35% de los habitantes en edad de 0 a 14 años, el 4.31% con limitación física, el 5.65% senil y el 40% sin seguro de salud, ubicados en las colonias Viveros Tulpetlac, Área nueva, La Presa, El Parque, Tecuexcomac, Plan de Ayala, Texalpa, Tlatempa, Industrial Cerro Gordo y Nuevo Laredo. El análisis de cambio de uso de suelo muestra que el uso de suelo urbano es el más vulnerable a inundación, éste ocupa el 66.77% del territorio e incrementó 3,673.9 ha de 1996 a 2016, el uso industrial incrementó 443.2 ha, esta transición económica del sector primario al secundario disminuyó la agricultura, también se perdió pastizal halófilo y vegetación halófila hidrófila al Este (zona aledaña al Caracol), mientras que al Oeste en la Sierra de Guadalupe se perdió pastizal inducido y 747.1 ha forestales, debido a la urbanización. Por su parte, el riesgo alto y muy alto de inundación, se ubica al noroeste en las colonias Luis Donald Colossio, y Parque residencial Coacalco, al noreste en Jardines de Morelos, al centro y sur municipal en Industrial Cerro Gordo, Jardines de Santa Clara, Ciudad Azteca, San Agustín, Xalostoc, Tablas del Pozo, El Chamizal, Las vegas y Valle de Aragón. El vertido público de desechos empeora el problema, ya que colapsa el drenaje, las colonias aledañas al Canal Las Sales, El Gran Canal, Río de los remedios y La Majada, son las más vulnerables a inundación y las que más vertederos clandestinos presentan, tal es el caso de Chiconautla, Industrias Tulpetlac, Tablas del Pozo, Santa Clara, San Agustín y El Chamizal.

1.0 Introducción

México es un país vulnerable a numerosos desastres, debido a sus características climáticas, orográficas, hidrológicas, vulcanismo y sismicidad, esto empeora a causa de actividades humanas que contribuyen a incrementar los riesgos y sus consecuencias negativas en la población, cuya vulnerabilidad aumenta por malas condiciones sociales y económicas (Organización para la cooperación y el desarrollo económico, OCDE, 2013).

En este contexto, un riesgo es la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural o antrópico destructivo en un área determinada (Pérez, 2007), recientemente se han contemplado los riesgos causados por la degradación ambiental producto del desarrollo económico-industrial y la urbanización (SEMARNAT, 2012). Con el fin de mitigarlos se han establecido estrategias políticas y de planeación que incluyen a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), útiles en la evaluación de riesgos (Ebert *et al.*, 2009).

Los SIG son una herramienta que utiliza datos georeferenciados para analizar el uso territorial, en México se cuenta con información geográfica pública y descriptiva de los recursos naturales, útil para generar un Sistema de Información Geográfica Medio Ambiental (SIGMA), que es la caracterización de un área mediante la recopilación, integración y análisis de esta información (Chico, 2010). La caracterización es fundamental dentro del Ordenamiento Ecológico Territorial (OET), seguida por las fases de diagnóstico, prospectiva y propositiva, además es la base para evaluar y zonificar riesgos partiendo del contexto ambiental y social de un área determinada (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998).

Entre los riesgos frecuentes en zonas urbanas están las inundaciones, benéficas en condiciones naturales, pero perjudiciales si hay asentamientos humanos en zonas potencialmente inundables (Camarasa-Belmonte, 2002).

En México las zonas costeras y bajas son las más susceptibles a inundarse (CENAPRED, 2004). El sistema de inventario de desastres muestra que en el periodo (1970-2011) ocurrieron 77 inundaciones en el país (DesInventar, 2014). De manera particular, el Estado de México cuenta con zonas que van de riesgo medio a muy alto de inundación (CENAPRED, 2004). Al noreste de esta entidad, se ubica Ecatepec de Morelos, el municipio más poblado del Estado de México con 1, 677, 678 de habitantes de los cuales el 99.93% es población urbana.

La alta densidad demográfica y las actividades económicas que se desempeñan en el municipio, ocasionan una alta tasa de generación de residuos sólidos. Según el SAPASE (Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec), el 70% de los problemas de inundación que se presentan en el municipio se deben a que la basura es arrojada en la vía pública y tapa el sistema de drenaje.

Se cuenta con el vertedero de residuos sólidos urbanos VRSU Chiconautla, a pesar de esto la disposición final de la mayor parte de los residuos domésticos municipales es el vertido clandestino a cielo abierto en el Gran Canal, el Río de los Remedios, barrancas, laderas y colonias como Prados San Juan, Santa Clara, San Agustín, Xalostoc, La Cañada o El Chamizal, entre otros. Lo anterior representa contaminación atmosférica, acuática, visual, e incrementa el riesgo de inundación, lo que en conjunto se traduce a problemas sanitarios en los habitantes, entre los más frecuentes están las enfermedades gastrointestinales, dermatológicas y respiratorias (Salinas, 2008).

2.0 Marco teórico

2.1 Cartografía automatizada

Desde tiempos remotos el humano ha tenido la necesidad de ubicarse espacial y temporalmente, establecer rutas en el territorio que habita e incluso descubrir nuevos horizontes, por este motivo se dice que el origen de la cartografía es casi tan antiguo como la humanidad, es notable que la evolución intelectual de la misma se ha visto reflejada en los medios de representación cartográfica, pasando desde los más primitivos planos pictóricos, hasta los mapas elaborados con conocimientos matemáticos y cálculos inherentes a la forma de la tierra, mapas elaborados a mano, impresos o análogos y más recientemente la cartografía digital o automatizada (Franco y Valdés, 2003).

La cartografía automatizada es la principal rama de la cartografía contemporánea, ésta se consolidó en la década de los noventas, se basa en la generación y diseño de mapas digitales auxiliándose de la tecnología, principalmente de computadoras, sensores remotos, programas y Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten realizar análisis geográficos de manera eficiente y eficaz (Franco y Valdés, 2003).

Dentro de las principales ventajas en la elaboración de cartografía digital se destacan (Celestino y Martínez-Alegría, 2003):

- Ahorro de tiempo (reducción de cálculos y procesos manuales).
- Optimización en la precisión de los resultados.
- Reducción de costos económicos.
- Manejo de gran cantidad de datos o información espacial.
- Versatilidad y flexibilidad en el proceso y productos cartográficos.
- Permiten mayor organización, ya que los datos pueden actualizarse, consultarse, extraerse y manipularse en cualquier momento.
- Provee diversas herramientas para elaborar cálculos, estadísticos, índices, medir distancias, hacer modelos predictivos, entre otras cosas dentro del análisis espacial-temporal.
- Integra la colecta de datos, el análisis y la toma de decisiones dentro de un mismo contexto.

2.2 Los Sistemas de Información Geográfica

2.2.1 Origen

Se puede afirmar que su origen se gestó con el cambio del formato análogo de los mapas al formato digital, por lo tanto su evolución está estrechamente relacionada con el desarrollo de la informática y la tecnología, en especial con el del *software* y el *hardware* (López *et al.*, 1998). En el cuadro se observa un resumen de la evolución de los SIG (hasta los noventas):

Cuadro 1. Evolución de los SIG. Modificación de Comas, D. Y Ruiz, E., 1993. En López <i>et al.</i> , 1998			
AÑO	EQUIPO TECNOLÓGICO	USUARIO	USO
1950	Primeros ordenadores	Ejército	<ul style="list-style-type: none"> • Uso militar • Atlas de flora británica
1960	<ul style="list-style-type: none"> • Mesas para digitalización • Plotters • Uso de formato ráster (píxeles) • Miniordenadores con procesador de 16 bits 	<ul style="list-style-type: none"> • Banco de datos de territorio. Canadian Geographic Information System (CGIS) • LCG (Harvard Computer Graphics Laboratory) 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación urbana • Investigación y educación • Gestión de recursos naturales
1970	<ul style="list-style-type: none"> • Miniordenadores 32 bits • Uso estructuras vectoriales en SIG (puntos, líneas, polígonos) 	UGI (Unión Geográfica Internacional)	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación y educación • Censos • Atlas nacional de España
1980	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenadores personales PC • SIG para PC • Escáner 	<ul style="list-style-type: none"> • Universidades españolas • Instituto Cartográfico de Catalunya • Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación territorial urbana • Registro, inventariado catastral
1990	<ul style="list-style-type: none"> • Integración tecnologías de teledetección, SIG y GPS • Avances en software vectorial y ráster • Primer Atlas digital de Canadá (1994) • Aparición del servidor cartográfico <i>MapServer</i> (1997) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ayuntamientos • Universidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación y educación • Aplicaciones globales
2000	<ul style="list-style-type: none"> • Aparición de Google Adwords (2000) • Aparición de Google maps (2005) 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso público • Sector privado 	<ul style="list-style-type: none"> • Fines varios, ubicación, desarrollo de aplicaciones, etc. • Geo-marketing (permite análisis de mercado apoyándose en el contexto territorial)

2.2.2 Definiciones de SIG

Las definiciones de SIG han ido cambiando a lo largo del tiempo y varían de acuerdo al autor en cuestión.

Un SIG es un sistema complejo compuesto por *hardware* (equipo físico), *software* (programas computacionales), *liveware* (recurso humano) y metodologías que en conjunto permiten la recolección, almacenamiento, tratamiento, análisis y representación gráfica de información geográfica (espacial, temporal y alfanumérica). Un Sistema de Información Geográfica en sí constituye una abstracción de la realidad y sus atributos: espaciales, temporales, ambientales, climáticos o demográficos. Es un conjunto organizado y funcional que permite el análisis, evaluación y planificación del territorio mediante información georeferenciada. Esta potencialidad de análisis es la que los diferencia de otros sistemas informáticos cuya función se limita a la representación espacial de la ubicación, sin mostrar atributos del territorio, ni permitir el uso de herramientas estadísticas o superposición de capas temáticas (Celestino y Martínez-Alegría., 2003)

Gutiérrez y Gould en 1994, los describieron como: *“Sofisticadas herramientas multipropósito con aplicaciones en campos tan dispares como la planificación urbana, la gestión catastral, la ordenación del territorio, el medio ambiente, planificación del transporte, mantenimiento y gestión de redes públicas o el análisis de mercados.”*

2.2.3 Elementos de un SIG

Los principales componentes de un SIG de acuerdo con Celestino y Martínez- Alegría en 2003, son:

- a) Hardware (equipo, escáner, PC, dispositivo GPS, elementos físicos).
- b) Personal capacitado (analista).
- c) Software (algoritmos, programas computacionales), dentro de los cuales se almacena y/o manipula la información geográfica o datos georeferenciados, distintos de otro tipo de datos porque cada uno posee una espacialidad (coordenadas).
- d) Bases de datos: las bases de datos son el núcleo central del SIG ya que en ellas está contenida la información espacial (posición geográfica) y temática (atributos) de los objetos

cartográficos en cuestión, estas se construyen a partir de datos tomados en campo, generados en un geoproceto o mediante la consulta de éstos en algún servidor cartográfico.

- e) Sistema gestor de bases de datos *DBMS Data Base Management System*: el DBMS se refiere al software que sirve para gestionar y analizar los elementos geográficos posicionales y temáticos contenidos en la base de datos.
- f) Sistema de digitalización de mapas: es útil cuando la información base no está en formato digital, es decir cuando se construye una base de datos cartográfica a partir de un recurso analógico o un mapa en papel, para este procedimiento se utiliza generalmente un escáner, aunque también puede hacerse la digitalización a partir de una imagen geo referenciada.
- g) Sistema de representación cartográfica: es aquél que permite dibujar mapas a partir del contenido de las bases de datos o los resultados del análisis espacial, la apariencia de la salidas dependerá de la escala, el tipo de formato de los datos y la calidad gráfica del software en cuestión.
- h) Sistema de geoprocetado y análisis de datos : este sistema permite relacionar datos espaciales y obtener nuevos mapas, además gracias a él se pueden llevar a cabo tareas como: asignar o cambiar el sistema de coordenadas de los datos, calcular superficies, agregar o cambiar atributos, clasificar, superponer capas, realizar cálculo de distancias, elevaciones, etc. (Celestino y Martínez- Alegría, 2003)

2.2.4 Formatos para la representación de datos

La información almacenada en los SIG está organizada en *layers* o capas, que son un conjunto de objetos espaciales lógicamente relacionados entre sí y sus atributos temáticos ya sean cualitativos o cuantitativos (Aronoff, 1989 en Basterra, 2011). Ésta relación lógica, geométrica y espacial que existe entre los objetos se denomina *topología*, la representación de ésta dependerá del tipo de modelo de datos en cuestión. Se distinguen principalmente los siguientes (Rodríguez, 2005):

SIG vectorial: Este modelo de representación es la base de la cartografía clásica análoga, en él la representación de los objetos espaciales es por medio de topologías: puntos, líneas o polígonos, es decir figuras de la geometría convencional, que están compuestas por vértices y segmentos. El vértice o nodo, es el elemento vectorial más sencillo que resulta del cruce de coordenadas (X, Y), es útil para representar objetos espaciales discretos como la ubicación de un árbol, una casa (puntuales) (Rodríguez, 2005).

Por su parte las líneas están formadas por la unión de dos nodos o vértices mediante un arco, ayudan mapear rutas, carreteras, vías de acceso o cursos hidrológicos (lineales) o límites geográficos estatales o municipales. Cuando un segmento inicia y termina en el mismo nodo o vértice forma un polígono en cuyo interior existe un área o superficie (ver figura 1), esta forma es útil para representar unidades definidas de suelo, paisaje, cuerpos acuáticos, etcétera. El formato vectorial más común es el fichero de formas (shapefile) (Rodríguez, 2005).

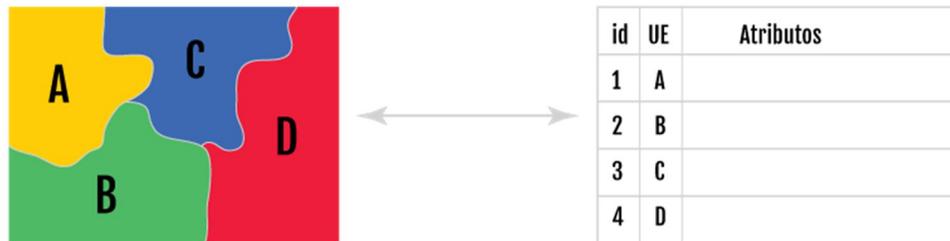


Fig.1. Ejemplo de representación gráfica de información geográfica vectorial (izquierda) y su respectiva base de datos (derecha): cada polígono posee un identificador numérico ID y cualitativo UE (A-D), además se pueden incluir atributos adicionales. Fuente: <http://www.ign.gob.ar/sig>

Modelo de red de triángulos irregulares (TIN): El modelo TIN (Triangulated irregular network) es una representación tridimensional, conformada por un conjunto de triángulos irregulares unidos entre sí (ver figura 2), cada triángulo tiene puntos (X, Y, Z), la variable Z es la que indica el atributo en cuestión, son útiles para analizar superficies, por lo que son muy empleados para representar la elevación del terreno, por ejemplo (Rodríguez, 2005).

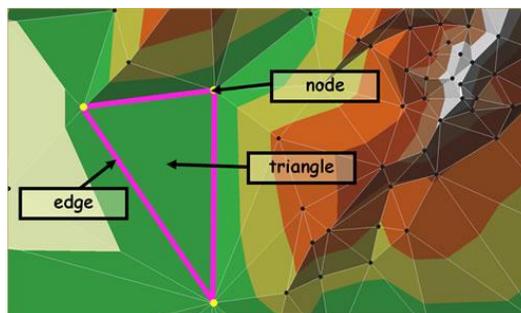


Fig.2. Modelo de representación triangulada TIN. Node= Vértice o nodo; Triangle= Triángulo; Edge=Arco o segmento. Fuente: <https://www.pinterest.com/davidkidd4/gis>

SIG Ráster: En este modelo de datos la unidad mínima de representación es el píxel (ver figura 3), estos están organizados en una cuadrícula o matriz de píxeles, cada píxel tiene un valor, numérico o alfanumérico, dependiendo del tipo de fenómeno que represente, si se trata de un fenómeno discreto, cada píxel tendrá una categoría (uso de suelo, tipos de vegetación,

entidades, etc), mientras que si se trata de un fenómeno continuo como la precipitación o la temperatura, cada píxel tendrá un valor numérico (milímetros anuales o grados centígrados) (Rodríguez, 2005).

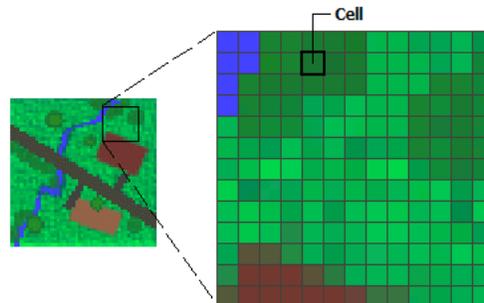


Fig.3. Modelo de representación ráster. Fuente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>. Cell= Celda o píxel.

Ubicación de píxeles, filas y columnas: La matriz ráster está compuesta por filas (row) y columnas (path), está representada por un sistema de coordenadas cartesianas, en el que las filas están paralelas al eje de las X, y las columnas al eje de las Y, de tal modo que la ubicación específica de cada píxel está dada por estas, y además asociada a un sistema de coordenadas particular, en la figura 4 se observa un ejemplo con coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), y la ubicación fila, columna es 5,1, coordenadas: 300.500 este, 5.900.600 norte (ESRI, 2016)

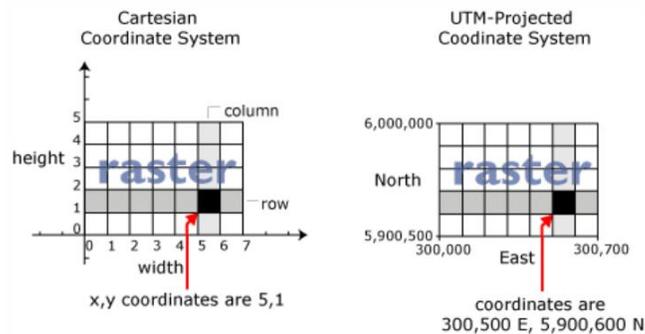


Fig.4. Ubicación de un píxel en una matriz ráster. Tomada de:

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Resolución espacial de un ráster: La extensión de cada celda está asociada a la *resolución espacial* y calidad del ráster, por lo que mientras más pequeñas sean las celdas, el grado de detalle será más nítido, y la resolución espacial mayor, por ejemplo si una celda mide 5 x 5

metros, la resolución de ese ráster es de 5 m. A mayor resolución, más pesados serán los datos, por ello es importante que el tamaño de píxel sea adecuado para representar a detalle el fenómeno a mapear, pero tomando en cuenta la capacidad de almacenamiento y procesamiento de la máquina (ESRI, 2016) (Ver figura 5)

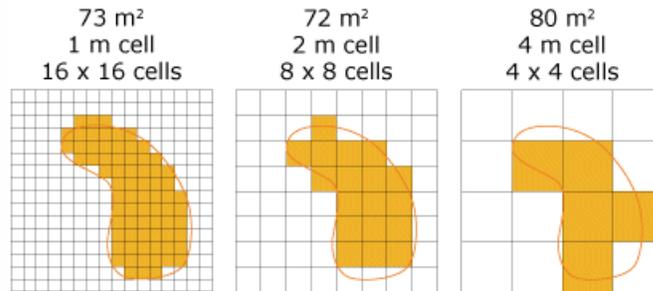


Fig.5. Comparación de resoluciones espaciales de mayor a menor (izquierda a derecha)

En términos de precisión espacial, el modelo vectorial es mejor, ya que marca límites directos, mientras que el modelo ráster es más útil si lo que se desea representar son fenómenos continuos como el clima (Rodríguez, 2005) (ver figura 6).

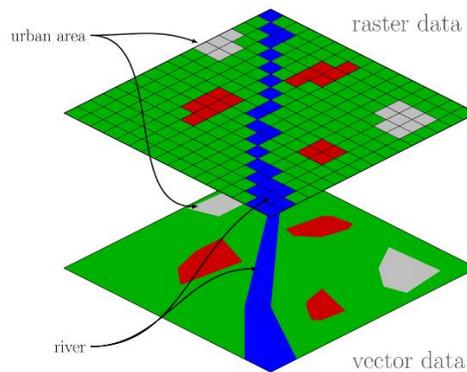


Fig.6. Comparación entre modelos de representación geográfica ráster y vectorial. Raster data= capa ráster; Vector data= capa vectorial; River=río; Urban área= área urbana. Tomada de <http://www.tysmagazine.com/los-sig-raster-herramienta-de-analisis-medioambiental-y-territorial/>

2.2.5 Álgebra de mapas

Como ya se mencionó, una capa temática ráster es una matriz de píxeles, cada píxel tiene un contiene información numérica o categórica referente al tema a mapear.

El *álgebra de mapas*, es el conjunto de técnicas y operaciones que permiten integrar dos o más capas (variables temáticas) referentes al mismo espacio geográfico, y con la misma resolución, para realizar análisis y extraer información derivada, ésta información estará contenida en una nueva capa, las operaciones empleadas dependerán del análisis (Tomlin, 1990).

Lo anterior es posible gracias a una calculadora de mapas, que permite realizar operaciones matemáticas con los valores contenidos en los píxeles de las capas ráster a integrar/analizar, por ello, aunque el análisis sea categórico o de atributos cualitativos es indispensable asignarle valores numéricos a la capa mediante una *reclasificación*. La reclasificación, consiste en agrupar diferentes categorías en una sola clase, con valor numérico. Los criterios de clasificación dependerán del usuario y del análisis en cuestión. Cuando los valores originales son numéricos es posible hacer intervalos para la agrupación, por ejemplo, en la figura 7 se observa la reclasificación de la altitud en categorías del 1 al 4 por intervalos (Vila y Varga, 2008).



Fig.7. Reclasificación de una capa ráster de altitud, en cuatro categorías. Obtenida de:

http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_5.pdf

Los operadores empleados en álgebra de manera genérica son: Locales: cada píxel en la nueva capa tendrá un valor en función de los valores que tuvo en las capas anteriores, por ejemplo: integraciones aritméticas (suma, resta, multiplicación, división, raíz, cuadrada, potencia); relacionales (integrar cantidades mayores >, menores < o iguales =, que un parámetro); Vecindad o focales: adjudican un valor a cada píxel de la capa nueva, en función del valor de los píxeles contiguos en el área circundante, (por ejemplo capas de interpolación por distancia, ya sean climáticas o de elevación); Zonal o regional: El valor de cada píxel de la capa resultante está en función del valor de todas las celdas que pertenecen a la misma clase; Global. El valor resultante de la función es obtenido a partir de todas las celdas de la capa (Rodríguez, 2008).

2.3 Aplicaciones de los SIG

2.3.1 Ordenamiento ecológico y territorial OET: Definición

La carta europea de ordenación del territorio lo define como “La expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales, y ecológicas de la sociedad. Es a la vez una disciplina científica, una técnica administrativa y una política concebida de manera interdisciplinaria y global, cuyo objetivo principal es lograr un desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física del espacio. El ordenamiento territorial consiste en conocer los recursos naturales con los que cuenta un determinado lugar con el fin de poder planificar el uso del suelo y sus potencialidades así como declarar áreas con importancia ecológica (La carta de ordenación del territorio, en la conferencia de Torremolinos, 1983).

2.3.2 Fases del OET

De manera genérica se pueden distinguir las siguientes fases metodológicas en los trabajos de ordenamiento territorial:

- a) Análisis territorial o caracterización: Esta fase es primordial, consiste en una aproximación al conocimiento del territorio, definiendo las características principales de éste: Ubicación geográfica, altitud, clima, características biofísicas-ambientales, demográficas, recursos naturales con los que cuenta (ubicación, distribución y cantidad de los mismos), actividades económicas, usos de suelo y situación política gubernamental (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998)
- b) Diagnóstico: Consiste en un análisis FODA del territorio (Fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas). Identificando así las potencialidades del mismo en términos de aprovechamiento de sus recursos, planificación urbana u ocupación de suelo y calidad de vida de la población, denotando también las problemáticas que merman su productividad (mala administración, amenazas naturales, problemas de infraestructura y aquello que deteriore la calidad de vida de la población). Un diagnóstico adecuado permite *proponer alternativas* para solucionar las problemáticas identificadas, sin embargo antes de tomar una decisión es necesario realizar los siguientes análisis (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998):

- Análisis coste-beneficio: en términos monetarios y ambientales.
 - Análisis multi-criterio: identificar y tener plena conciencia de los factores sociales, políticos, ambientales y territoriales que involucra la toma de decisiones. ^[5]
 - Simulaciones: creación de escenarios futuros a través de modelos. ^[5]
 - Evaluación de impactos: es una de las técnicas más utilizadas y consiste en realizar un balance entre los impactos positivos y negativos que podría tener una decisión de contexto territorial en el medio-ambiente, la población y la economía a corto, mediano y largo plazo (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998).
- c) Fase propositiva: una vez sopesados los beneficios y perjuicios que conlleva la toma de una decisión o la implementación de una alternativa, pueden elaborarse propuestas formales para aprovechar mejor el territorio o solucionar problemáticas dentro del mismo, esta etapa tiene un carácter estrictamente normativo ya que debe apegarse a las leyes y jurisdicción ambiental/social en turno, por lo que debe estar coordinada directamente con la administración gubernamental (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998).
- d) Fase prospectiva: dado que en última instancia la ordenación territorial tiene por objetivo crear un modelo a futuro de uso territorial ésta fase se basa en las perspectivas a largo plazo, apoyándose en modelos con bases razonablemente científicas y sustentadas (Barragán, 1993 en Pujadas; Font, 1998).

2.3.3 Análisis espacial y modelos

El análisis espacial se compone por un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas que son aplicadas a datos geográficos y a las topologías (relación lógica, geométrica y espacial) que existen entre los mismos. El análisis puede llevarse a cabo a diferentes profundidades (Buzai y Claudia, 2006):

Análisis de localización: este tipo de análisis se limita a ubicar puntos geográficos, referentes al fenómeno de estudio, por ejemplo: la delimitación de zonas de conflicto, focos de riesgo, individuos, aptitud territorial para la agricultura, la ubicación de parques recreativos, rellenos sanitarios o lugares de interés en general (Buzai y Claudia, 2006).

Distribución espacial: considera que las entidades geográficas de un mismo tipo se encuentran esparcidas en el espacio geográfico de una manera determinada, es decir que obedecen un patrón. Por ejemplo análisis acerca de la distribución espacial real o potencial de una especie en peligro, geografía humana, distribución de recursos naturales, etcétera. Toda la información distributiva puede ser útil para calcular densidades o intervalos de clase (Buzai y Claudia, 2006).

Asociación espacial e interacción espacial: toma en cuenta la relación que existe entre los diversos atributos de un mismo espacio. Una de las formas más simples de hacer éste análisis es la superposición cartográfica, es decir, observar como un mismo espacio o zona delimitada cuenta con diferentes atributos (intersección de dos o más capas temáticas), y como se relacionan entre sí (Buzai y Claudia, 2006).

Evolución espacial: además de la componente geográfica espacial éste análisis toma en cuenta la componente temporal y transición a través de la misma, por ejemplo un análisis del cambio de uso de suelo, la migración poblacional, el incremento o descenso demográfico, contaminación, temperatura, todo elemento mapeable susceptible al cambio (Buzai y Claudia, 2006).

A partir de estos análisis se pueden construir **modelos**, los cuales son representaciones o abstracciones de la realidad (espaciales y temporales), que se construyen partiendo de un diseño simplificado o esquema que permita comprenderla mejor, generalmente integran variables ambientales y/o sociales. A través del modelado se pueden obtener herramientas que permitan gestionar los recursos, evaluar riesgos o realizar una mejor planificación territorial, creando escenarios futuros (Buzai y Claudia, 2006).

2.3.4 Evaluación de riesgos

Con anterioridad las investigaciones acerca de riesgos a fenómenos naturales se centraban en la ubicación y distribución espacial de las amenazas, su frecuencia, periodicidad y magnitud, esto desde el enfoque de las ciencias naturales, tomando en cuenta sólo la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente peligroso dentro de un período determinado en un área dada, mientras que en el enfoque de las ciencias aplicadas, se incorporan aspectos sociales como la vulnerabilidad de la población (ubicación, estrato socioeconómico, acceso a servicios de salud, etcétera.) La vulnerabilidad ha sido redefinida, no sólo es una medida de pérdidas o daños asociados a una amenaza específica (o probabilidad de que ocurra un

fenómeno natural destructivo), sino también la incorporación de la capacidad de la población para reponerse a dicho daño. Ratick en el 1994 clasifica a la vulnerabilidad en términos de: **Exposición:** Relación e intersección entre las actividades humanas, los usos de suelo y el medio ambiente con los patrones de amenaza; **Resistencia:** Capacidad de la sociedad y el medio a resistir el impacto de los eventos amenazantes.; **Resiliencia:** Capacidad de recuperación después de un desastre. **Aprendizaje y adaptación:** Capacidad de la sociedad de modificar sus patrones de conducta a raíz de la ocurrencia de desastres. Por lo que $Riesgo = Amenaza + Vulnerabilidad$ (Maskrey, 1998).

Para realizar un análisis de riesgo en un ambiente SIG, es necesario primero plantear el modelo de manera conceptual o esquematizada, en el que se muestren las variables ambientales y sociales a tomar en cuenta y la integración de las mismas, es importante que los datos reales disponibles para dicho fin puedan representarse como entidades espaciales (sean mapeables) (Maskrey, 1998).

2.4 Las inundaciones, definición, impacto y clasificación

El agua es el recurso natural más primordial para la vida, sin embargo los desajustes en el manejo del mismo y el cambio climático han llevado a situaciones extremas en torno a él: las sequías e inundaciones. En nuestro país a causa de desastres hidro-meteorológicos han ocurrido alrededor de 10,000 muertes, de 1980 a 1999 (aproximadamente 500 anuales) y perjuicios económicos que alcanzan un promedio anual cercano a 500 millones de dólares. Una inundación se define como el incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos, canales e incluso el mar, este evento es ocasionado por múltiples factores: aumento en la precipitación, oleaje, o falla de alguna estructura hidráulica, lo anterior empeora cuando la evaporación en el área es baja o no existe cubierta vegetal o suelo desnudo que capte el agua (ver figura 8, ciclo del agua) (CENAPRED, 2004).

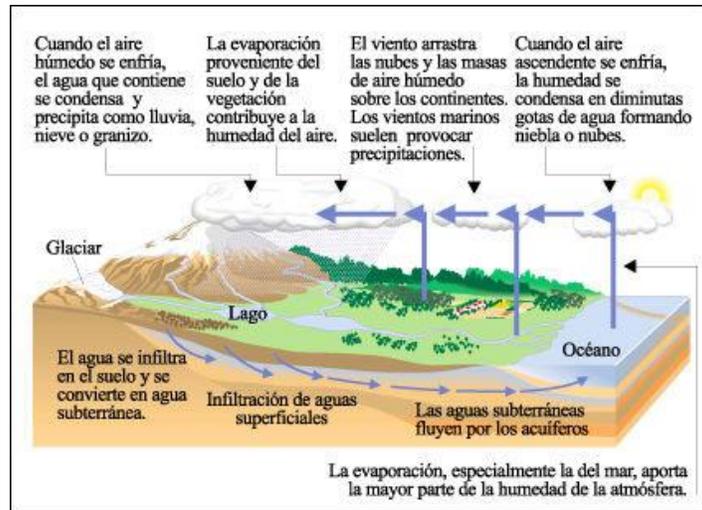


Fig.8. Ciclo hidrológico. Tomada de: <http://sistemajpii.blogspot.mx/2011/03/ciclo-hidrologico.html>

De acuerdo con su origen las inundaciones se clasifican en: Costeras: En zonas cercanas a la línea de costa o al mar, se presentan cuando el nivel medio de éste asciende por la marea; pluviales: causadas por el aumento en la precipitación y fluviales: causadas por desborde de ríos o cuerpos acuáticos (CENAPRED, 2004).

2.4.1 Inundaciones en cuencas endorréicas, la cuenca del Valle de México

La cuenca de México tiene una extensión aproximada de 7,000 km², es una cuenca endorréica (ver figura 9), se encuentra delimitada por el eje Neovolcánico, abarcando los estados de México, Ciudad de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla, en la antigüedad estaba compuesta por lagos sómeros unidos entre sí, cuyas aguas escurrían acarreado sales y desembocaban en el Lago de Texcoco, para evaporarse en la atmósfera (Ezcurra, 1990).

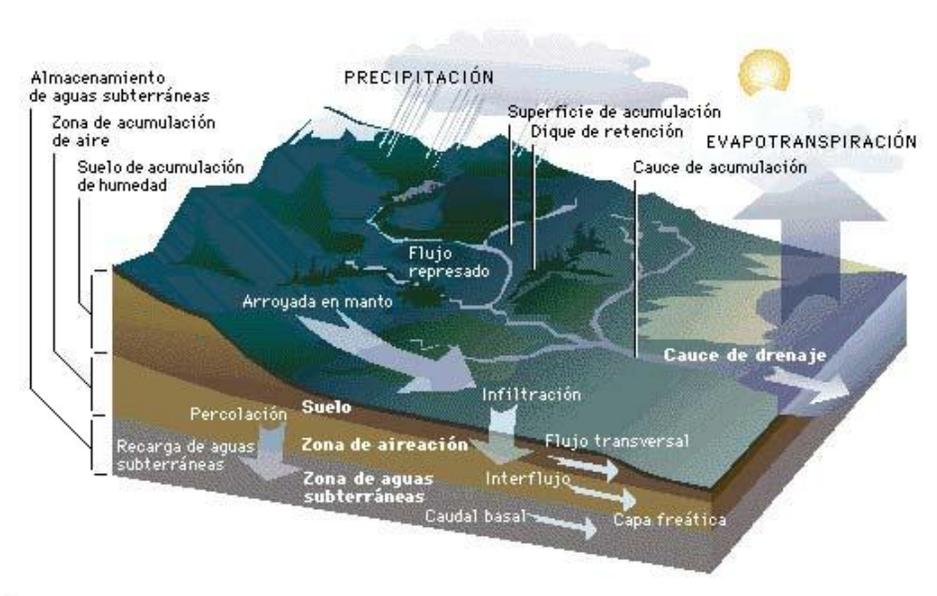


Fig.9. Cuenca endorréica o lacustre, el cauce de drenaje va a parar a un lago. Tomada de: <http://climaehidro.galeon.com/enlaces2683785.html>

Sin embargo, en la actualidad ésta escorrenría y el ciclo natural del agua se alteró, ya que la urbanización impermeabilizó el suelo, no hay infiltración eficiente, a pesar de que la cuenca se encuentra drenada de manera artificial y el agua queda atrapada en la superficie de acumulación o llanura de inundación (figura 9).

Además la extracción de agua subterránea ha provocado hundimientos del suelo, que a su vez producen daños en el drenaje, perjuicios en viviendas e incrementan las inundaciones en los asentamientos humanos que yacen sobre ella.

Tal es el caso de Ecatepec de Morelos, que se ubica en una porción del antiguo Lago de Texcoco (ver figura 10).

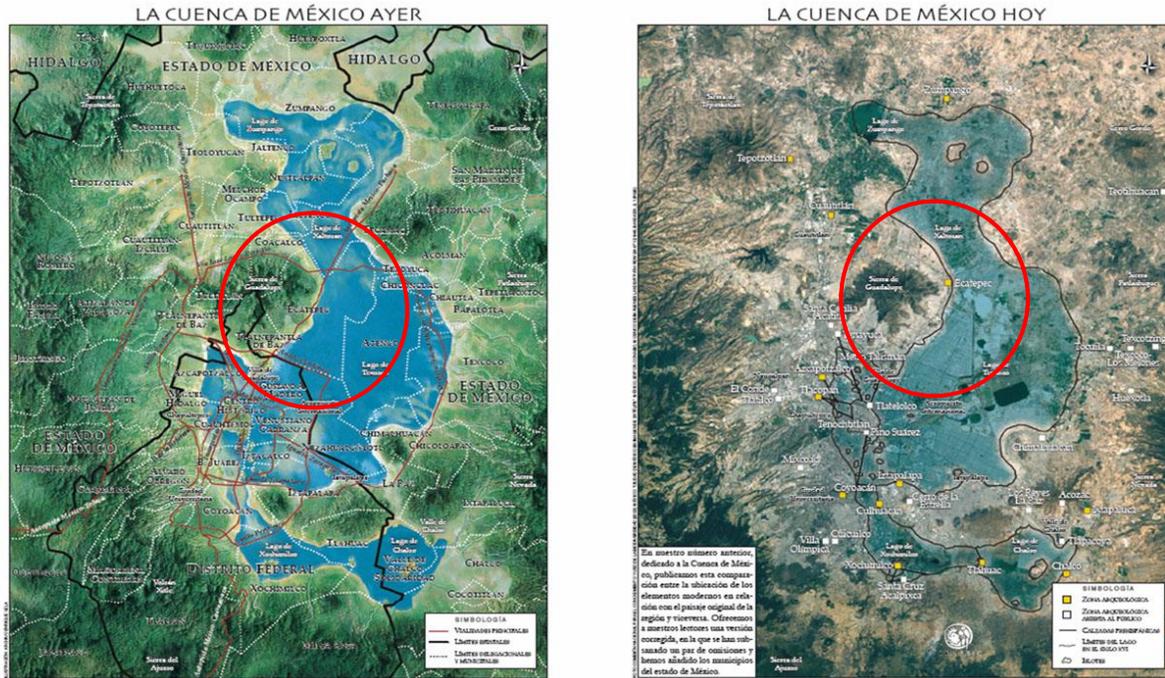


Fig.10. Delimitación de la cuenca del Valle de México, el círculo denota la ubicación de Ecatepec. Imagen tomada de: http://fundacionunam.org.mx/wp-content/uploads/2016/05/CUENCA_contenido2.jpg

2.5 Descripción de variables ambientales contempladas en el SIGMA y su implicación en el riesgo de inundación

2.5.1 Elevación y pendiente

La formación del relieve, depende de factores endógenos: tectónica de placas, vulcanismo o procesos internos terrestres, y exógenos: relacionados con el clima, el viento, el agua, el hielo, la actividad biológica de animales y plantas o la propia gravedad (Errázuriz *et al.*, 1998). El relieve del Estado de México es principalmente de origen volcánico, forma parte de las provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (ver figura 11), particularmente Ecatepec de Morelos, pertenece al Eje Neovolcánico y a la sub-provincia Lagos y volcanes del Anáhuac (INEGI, 2009).

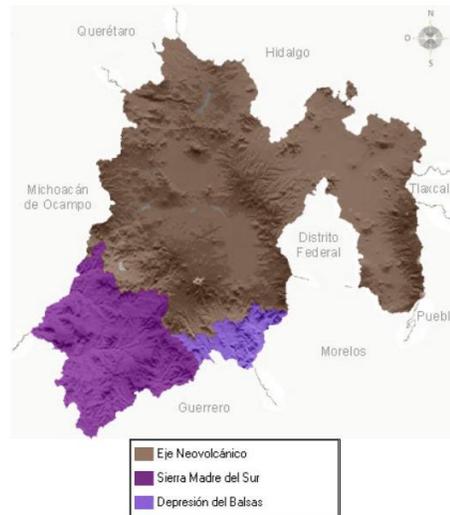


Fig. 11. Mapa del relieve del Estado de México. Fuente: INEGI, 2009. Tomada de: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/relieve.aspx?tema=me>

Las Sierras son formaciones antiguas del relieve, ya que debido al desgaste por intemperismo tienen una forma achatada y baja altitud, respecto a formaciones jóvenes cuya altitud es mayor y poseen una morfología puntiaguda (Errázuriz *et al.*, 1998).

El relieve se relaciona con el riesgo de inundación, ya que este incrementa en zonas con pendiente suave o planicies lacustres, debido a que el agua de la precipitación pluvial cae por las zonas con relieve, arrastrando sedimentos y se acumula en ellas.

2.5.2 Geología

De acuerdo con el ciclo de las rocas, las primeras rocas en formarse son *ígneas intrusivas* (plutónicas), que resultan del enfriamiento y cristalización del magma que brota de la corteza terrestre, a la par de ésta actividad volcánica (concretamente en las erupciones) se forman las rocas *ígneas extrusivas*, tienden a ser de grano fino debido a que pasan por un enfriamiento magmático rápido, lo anterior les confiere menor permeabilidad que las rocas ígneas intrusivas, que presentan tamaño de grano de medio a grueso. (Servicio Geológico Mexicano-SGM, 2013). Posteriormente, los materiales superficiales son transportados por el viento, el agua, hielo, o los organismos biológicos, y se depositan formando rocas *sedimentarias* (Tarbuck, E. J *et al.*, 2005); (INEGI, 2002).

Las unidades sedimentarias se forman por depósito, los depósitos aluviales y lacustres se originan como resultado de la acumulación de sedimento en una depresión, en la que

originalmente había un lago, río o corriente acuática, los procesos involucrados en dicho fenómeno son: erosión del suelo, transporte, deposición y consolidación. Las gravas, arenas, cantos o bloques (partículas gruesas) se depositan en las riveras, los limos y arcillas (partículas más finas y ricas en materia orgánica) alcanzan el centro del lago.

Las rocas sedimentarias al formarse por depósito, facilitan que los estratos inferiores se fundan por las altas temperaturas, siendo modificados química y mecánicamente para dar lugar a las rocas *metamórficas*. Después de la formación de rocas metamórficas, parte del material fundido regresa al magma terrestre para comenzar de nuevo el ciclo, el cual se muestra en la figura 12:

De manera general, los fragmentos de textura más fina son los más susceptibles a inundarse, ya que su permeabilidad es deficiente y promueven la acumulación de agua (Díaz-Rodríguez, 2006).

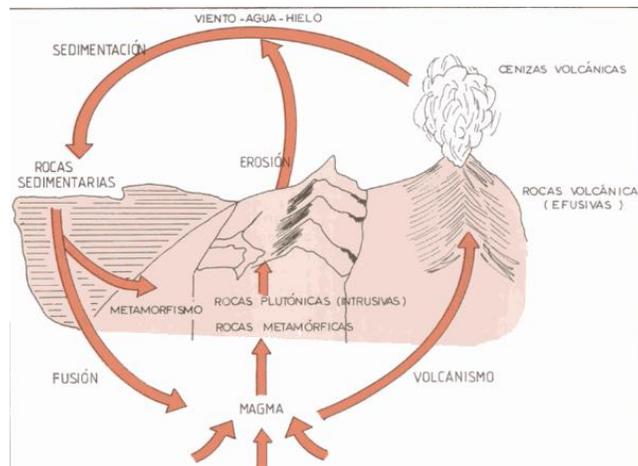


Fig. 12. Ciclo de las rocas, tomado de: Errázuriz *et al.*, 1998.

2.5.3 Edafología

El suelo es la capa con actividad biológica más superficial de la corteza terrestre, surge como resultado de varios procesos, los procesos formadores de suelo pueden agruparse en transformaciones orgánicas e inorgánicas de la roca madre, translocaciones de elementos (carbonatación, salinización) o físicas (transporte de arcillas) y podsolización (movilización de materia orgánica, aluminio y hierro). El suelo posee varios estratos y horizontes bien diferenciados por sus características físicas, químicas y biológicas (desde el lecho rocoso hasta

la capa con materia orgánica en descomposición o mantillo), es con base a las cualidades de los horizontes que se clasifican en diferentes tipos. El origen de cada suelo determinará su potencial uso, la cantidad de nutrientes que posea, sus cualidades para la construcción, entre otras cosas (Badía, 2011).

El suelo se relaciona con el riesgo de inundación, ya que los suelos lacustres promueven hundimientos que dañan el drenaje y además la velocidad de permeabilidad o filtración de agua va depender de la textura, es decir que entre más gruesa sea la textura más rápida la filtración.

2.5.4 Hidrología superficial y capacidad de microcuencas

La hidrología superficial de un territorio, se compone de corrientes y cuerpos de agua someros, y es distinta a la hidrología subterránea. Debido a que existe la posibilidad de desbordamiento de esta a consecuencia de la precipitación pluvial, los asentamientos o núcleos urbanos deben estar a una distancia considerable de ella. Debido a que eso no siempre ocurre, las inundaciones son frecuentes en zonas urbanas con planificación territorial y diseño de alcantarillado inadecuado (Gómez, 2007)

Otro rasgo hidrológico que incrementa la susceptibilidad a inundación, es la capacidad de microcuencas, las cuales son subunidades de la cuenca hidrográfica: unidad física y geográfica en la cual tienen lugar todos los procesos naturales, ambientales y sociales (actividades económicas) (Mendoza y Orozco, 2014). Mientras menor sea la superficie de estas, menor capacidad de almacenaje de agua tendrán, por ende es más factible que se saturen y que el terreno se inunde.

2.5.5 Usos de suelo y vegetación

El uso de suelo se refiere a la ocupación de una superficie determinada en función de su capacidad agrológica y por tanto de su potencial de desarrollo, se clasifica de acuerdo a su ubicación como urbano o rural, representa un elemento fundamental para el desarrollo de la ciudad y sus habitantes ya que es a partir de éstos que se conforma su estructura urbana y por tanto se define su funcionalidad. Para que la ocupación del suelo sea óptima debe haber planificación territorial, cuando esta no es adecuada no se aprovechan los atributos del mismo, siendo una de las consecuencias más graves poner en riesgo a la población, por establecimiento de asentamientos habitacionales en zonas en peligro de deslave, sismicidad, inundación, entre otras (PAOT, 2003).

Por ejemplo, en particular la cuenca del Valle de México es una zona potencialmente inundable por sus características biofísicas y por su pasado lacustre, y en varias zonas de esta no se planificó de manera adecuada el uso habitacional ni la construcción del drenaje, por lo que la problemática se ve agravada, además del uso de suelo la presencia de coberturas vegetales influye de manera positiva a contrarrestar las inundaciones porque captan agua.

2.5.6 Aspectos climáticos

El clima se define como el estado típico de la atmósfera en una región determinada, se expresa mediante elementos meteorológicos como la temperatura, la precipitación, la evaporación, la humedad en el aire, velocidad de los vientos, entre otros y ésta determinado por la ubicación geográfica de la región (latitud y longitud), distribución de las masas continentales, oceánicas, corrientes marinas y el relieve o barreras orográficas presentes.

Podemos dimensionarlo temporalmente: variaciones diarias conocidas como “el tiempo” o a través de los meses “estaciones” y espacialmente: microclima: condiciones meteorológicas específicas que se dan a la sombra de un árbol o una hoja, en una grieta o en cierto nivel del subsuelo, este determina el tipo de organismos presentes; mesoclima (nivel local) y macroclima (nivel país o región) (Heuveldop *et al.*, 1986).

Los principales aspectos meteorológicos que influyen en las inundaciones son la precipitación pluvial, que incrementa el riesgo en el caso de lluvias atípicas o por contribuir al desborde de canales y drenaje, y la evaporación, que puede ayudar a disminuirlo.

2.6 Gestión de RSU (Residuos sólidos urbanos)

Los *residuos sólidos urbanos (RSU)* son todos aquellos desechos provenientes de las actividades humanas y animales en las ciudades (domiciliarias, industriales, comerciales y de construcción o demolición) (Kless y Coccato, 2005)

Actualmente a consecuencia de la explosión demográfica, la industrialización y el ritmo de vida consumista, ha incrementado la producción de residuos, el mal manejo de los mismos y la carencia de educación ambiental en la población ha favorecido la presencia de vertederos clandestinos a cielo abierto, lo anterior provoca contaminación atmosférica, acuática subterránea por filtración de lixiviados, propicia la erosión de suelos al arrasar con la cubierta

vegetal y genera problemas sanitarios, por la proliferación de bacterias y vectores infecciosos. Dicho lo anterior, es indispensable la gestión adecuada de los mismos.

La gestión de residuos, puede definirse como el conjunto de procedimientos que tienen por objetivo darles a éstos el destino más adecuado de acuerdo con su origen, composición, volumen, posibilidades de reciclaje o aprovechamiento, todo lo anterior tomando en cuenta el coste del tratamiento y la normativa legal del área geográfica en cuestión, éste enfoque es meramente post-consumo, sin embargo es también indispensable tener presente que la forma de producción y comercialización de los bienes de consumo es la raíz de la naturaleza de los desechos (puede contribuir a facilitar su tratamiento y aprovechamiento o mermarlo), por lo que no se puede perder de vista el enfoque pre-consumo. De manera general pueden distinguirse cuatro fases en la gestión de desechos:

1.- Pre-recogida: consiste en las técnicas de clasificación de los desechos, el almacenamiento, manipulación y empaquetamiento de los mismos; **2.- Recogida** y transporte: traslado de los residuos a una planta para su compactación y transporte al destino definitivo; **3.- Tratamiento:** operaciones encaminadas a aprovechar la mayor cantidad de materiales posibles y a la eliminación definitiva de aquello que no es reutilizable, los procedimientos más comunes son: compostaje, incineración, reciclaje y vertido controlado y ; **4.- Vertido:** consiste en el traslado de todos los residuos y subproductos que no pueden ser eliminados por completo y tampoco reutilizados (André y Cerdá, 2006)

2.6.1 Contexto nacional de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (GRSU)

El manejo de residuos sólidos en México de manera genérica se reduce a su recolección y disposición final, aunque existen ciudades que le dan tratamiento a estos. Se estima que el 87% de los desperdicios generados en el país es recolectado, el 64% de estos residuos van a parar a rellenos sanitarios, mientras que el 36% restante es vertido en condiciones inadecuadas a cielo abierto. Se generan en promedio 95,000 toneladas de basura al día, lo que se traduce a 35, 000, 000 de toneladas al año, de las cuales un 53% corresponde a residuos orgánicos biodegradables, 28% son reciclables y 19% son otro tipo de residuos (biológico-infecciosos, peligrosos o no aprovechables); Se estima que en el país se provecha menos del 50% de los residuos que son reciclables debido a que no existe una adecuada separación y tratamiento de los mismos (SEMARNAT, 2007).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), clasifica a estos en: residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de manejo especial (RME), de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), en las últimas décadas la composición y cantidad de los mismos ha variado e incrementado, como producto de la urbanización, industrialización y el cambio en los hábitos de consumo, y de continuar como hasta ahora se estima que en la próxima década el volumen de residuos anual superará las 45 millones de toneladas. Por ésta razón a pesar de que el relleno sanitario es el método de disposición final de residuos que impera en México (debido a su bajo costo económico) es necesario repensar las estrategias en la GRSU con la finalidad de: evitar su acumulación para reducir los riesgos sanitarios, promover menor producción de residuos, optimizar su recolección y tratamiento, para reincorporarlos en la cadena productiva (valorización) (Chávez, 2010).

2.7 Teledetección

La *percepción remota* en su sentido más literal es la interpretación y procesamiento de imágenes de la Tierra que son obtenidas a través de un sensor remoto espacial, éstas técnicas de obtención de imágenes son conocidas como teledetección (Chuvienco, 2002).

Un sistema de *teledetección* espacial se compone genéricamente de los siguientes elementos (ver figura 13) (Chuvienco, 2002):

- a) Fuente de energía: Para que la captura de imágenes de la superficie terrestre sea posible es necesario que exista una interacción energética entre el objeto y el sensor (ya sea por reflexión de la luz solar o de un foco externo)
- b) Cubierta terrestre: Compuesta por agua, masas vegetales, suelos, relieve, edificaciones humanas, etcétera. Cada uno de esos objetos tiene una *firma espectral* característica (valores de absorción y reflexión de la luz específicos de acuerdo con su composición física)
- c) Sistema sensor: Compuesto por una plataforma espacial y el sensor, quién tiene el objetivo de captar la energía procedente de la superficie terrestre, codificarla y enviarla a un sistema receptor.
- d) Sistema receptor-comercializador: Recibe la información obtenida de la plataforma, la graba en un formato adecuado, realiza correcciones y la distribuye a los interesados (existen distribuidores gratuitos y aquellos que asignan un costo a las imágenes)

- e) Intérprete: Convierte las imágenes del satélite en información temática de interés, es decir identifica coberturas vegetales, cuerpos de agua, ríos, carreteras, etcétera (todo esto con base a las firmas espectrales de los objetos geográficos), este proceso puede ser visual o digital.
- f) Usuario final: Aquél que consulta la información con finalidades varias (investigación o resolución de problemas) (Chuvieco, 2002).

La visión humana constituye un sistema de teledetección sofisticado, sin embargo la teledetección remota artificial sirve como intermediaria para observar fenómenos que son imperceptibles dado que no están dentro del espectro visible del ojo, por ejemplo la temperatura (Chuvieco,2002).

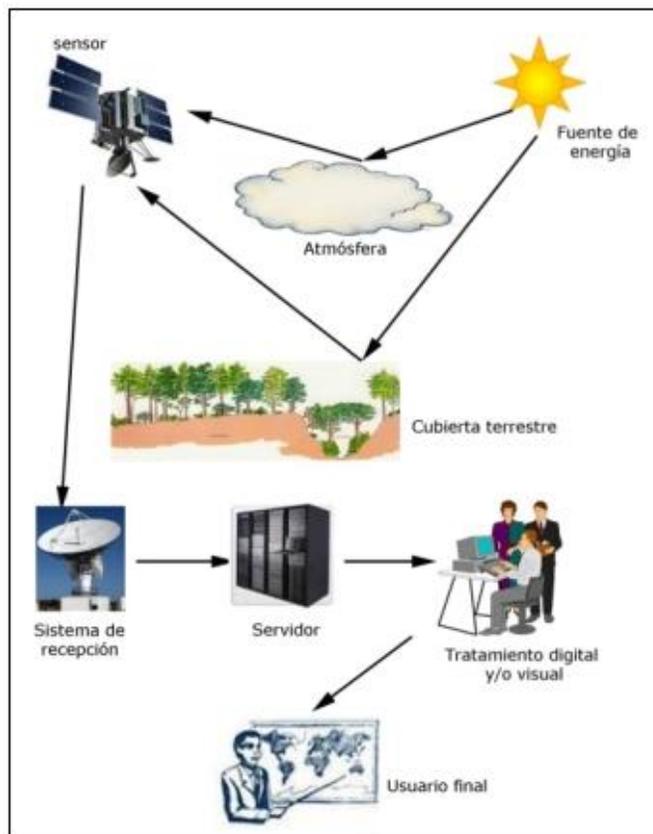


Fig.13. Elementos de un sistema de teledetección. Fuente: <https://comunidadrediam.wordpress.com/page/2/>

2.7.1 Principios físicos de Teledetección

La teledetección es entonces, la técnica que permite la obtención de imágenes a distancia de la superficie terrestre, esto es posible debido a la interacción entre el objeto terrestre y el sensor remoto. Esta interacción se basa en el flujo energético de la luz (sea solar o artificial) que permite que el objeto absorba y refleje la luz de manera particular (cada cobertura tiene una firma espectral). De manera genérica, la energía es transmitida de un cuerpo a otro por: convección (transporte de calor por movimiento de un fluido); conducción (transmisión directa de calor de un cuerpo a otro) y radiación (emisión de energía lumínica, térmica o magnética) (Chuvieco, 2002).

Particularmente el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor remoto constituye una radiación electromagnética, compuesta por ondas (ver figura 14), ésta ha sido explicada físicamente por dos teorías: aquella que la asume como un haz ondulatorio (Huygens y Maxwell) y aquella que considera a la luz como un haz de unidades discretas (fotones) (Planck y Einstein) (Chuvieco, 2002). Por lo que podemos definir cualquier energía radiante (en éste caso la luz) por medio de su longitud de onda y frecuencia. A pesar de que los valores de longitud de onda son continuos, se han establecido diferentes bandas, en cada una de estas bandas los valores se agrupan por ser similares y en conjunto se denominan espectro electromagnético (Chuvieco, 2002). El cuadro 2 muestra los espectros electromagnéticos que son captados comunmente por los sensores de teledetección, y su utilidad en percepción remota y fointerpretación:

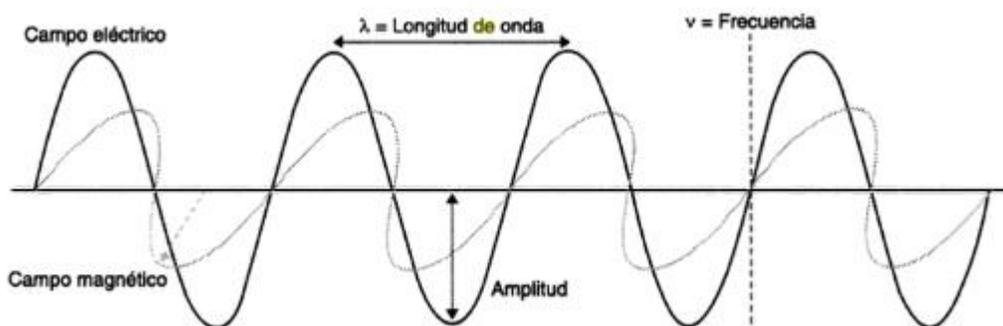


Fig.14. Esquema de una onda electromagnética. Tomada de (Chuvieco, 2002).

Cuadro 2. Espectros electromagnéticos captados por sensores satelitales (Tosini y Pantaleone, 2012)

Espectro	Utilidad
Visible (0,4 a 0,7 micras - μm)	Es la única radiación que puede percibir el ojo humano y en ella se distinguen tres bandas elementales: azul; verde y rojo
Azul (0,4-0,5 μm)	Detección de cuerpos de agua, costas y clasificación de coberturas boscosas
Verde (0,5 – 0,6 μm)	Evaluación de la calidad de la vegetación, diferenciación de tipos de rocas.
Rojo (6,0 – 7,0 μm)	Absorción de clorofila, clasificación de rocas, suelos y vegetación.
Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,3 μm)	Distingue coberturas vegetales y humedad
Infrarrojo medio (IRM: 1,3 a 8 μm)	Capta el calor/visión térmica.
Infrarrojo lejano térmico (IRT: 8 a 14 μm)	humedad vegetal o de suelos e incendios.
Micro-ondas (por encima de 1 μm)	Nubes.

2.7.2 Resoluciones de un sensor para teledetección: espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular

La *resolución espacial*, es el tamaño de píxel de la imagen obtenida por el satélite, dicho de otro modo, puede interpretarse como el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido por el sensor, esto dependerá de la altura, velocidad de exploración y el número de detectores del mismo. Es fundamental ya que de ésta dependerá la precisión de la información obtenida, la fiabilidad de la interpretación y la calidad de la misma, si el análisis es detallado conviene que el tamaño de píxel sea fino, por el contrario, si es una análisis general, conviene un tamaño de píxel más grande, para reducir la variabilidad de categorías (Pérez y Muñoz, 2006).

La *resolución radiométrica*, se refiere a la capacidad del sensor para captar niveles de radiancia o reflectividad de luz solar o artificial, por parte de los objetos. Cuando el sensor capta esta información la traduce a un sistema binario de bits, a mayor capacidad de almacenamiento de bits, mejor resolución radiométrica, los sensores Landsat por ejemplo, tienen resolución radiométrica de 8 bits, pero hay otros sensores que llegan a tener entre 10 y 12 bits, por su parte la *resolución espectral* indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, esto permite la diferenciación de coberturas (Pérez y Muñoz, 2006). La *resolución temporal*, es la periodicidad con la que el sensor obtiene imágenes de un área geográfica, determina la capacidad que tiene un sensor para detectar cambios, por lo que es crucial en estudios evolutivos, está condicionada por la velocidad, el ángulo de barrido y el tipo de órbita del sensor, a este conjunto o trayectoria del sensor se le denomina plano orbital, ver figura 15, la *resolución angular*, hace referencia a la capacidad que tiene un sensor de hacer movimientos oblicuos o diagonales, lo que permite obtener información estereoscópica o tridimensional como el relieve. Cabe destacar que ningún sensor es mejor que otro, algunos serán más adecuados para ciertos fines, que otros (Pérez y Muñoz, 2006).

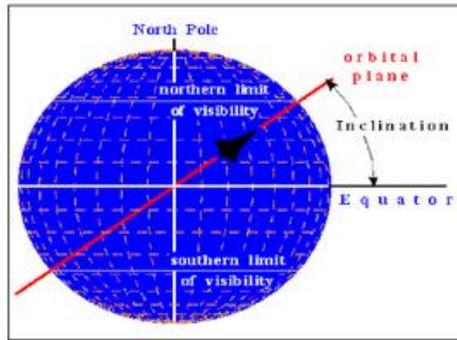


Fig. 15. Resolución temporal de un sensor. Tomada de: (Pérez y Muñoz, 2006).

2.7.3 Sensores satelitales Landsat (bandas y composiciones para coberturas)

El nombre de los satélites Landsat se descompone en Land= tierra y sat= satélite y son los primeros sensores remotos enviados por Estados Unidos para monitorear el estado de los recursos terrestres. Los sensores Landsat cuentan con 7 u 8 bandas espectrales, con las cuales pueden efectuarse combinaciones para monitorear: coberturas vegetales, agua, geología, usos de suelo, y recursos naturales en general. Estos sistemas de teledetección están al mando de la NASA (National Space and Space Administration), mientras que las imágenes son producidas y comercializadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (INEGI, 1984).

Landsat 5 TM (Thematic Mapper): Es un sensor de barrido multiespectral con resolución espacial de 30 metros y una franja de cobertura de 185 kilómetros por escena. Posee siete bandas que operan simultáneamente y se enlistan en el cuadro 3 (INEGI, 1984):

Cuadro 3. Resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de Landsat 5. Tomada de (INEGI, 1984)

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Multiespectral	30	Banda 1 azul:	0.45 - 0.52	8 BITS	16 Días
		Banda 2 verde:	0.52 - 0.60		
		Banda 3 roja:	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano1:	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano2:	1.55 - 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio:	2.08 - 2.35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico:	10.4 - 12.5		

Landsat 8: Éste satélite incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS), ambos facilitan la identificación de recursos hídricos, nieve y nubes. Posee nueve bandas, una resolución espacial de 30 metros y capta escenas de 170 kilómetros (Ariza, 2013).

En el cuadro 4 se muestran las características de las bandas espectrales de Landsat 8:

Cuadro 4. Resolución espectral y espacial de Landsat 8. Tomada de (Ariza, 2013).

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

(USGS. 2013)

2.8 Percepción remota y SIG

El desarrollo de los SIG y la teledetección están estrechamente relacionados con el avance de la ciencia y la tecnología, ambas técnicas surgieron como disciplinas independientes y por muchos años se utilizaron únicamente con fines bélicos y/o económicos. Sin embargo en los últimos años se han combinado principalmente para generar información medioambiental e investigación científica. Los principales productos de la teledetección son imágenes de satélite, dado que los análisis medio-ambientales obligadamente involucran variables geográficas resulta muy útil procesarlas utilizando los SIG, ya que éstos tienen la potencialidad de trabajar con información ráster. Además permite generar información geográfica actualizada y a escalas grandes, algo indispensable debido a la carestía de ésta en algunos países como México (Chuvieco, 2002).

Algunas **aplicaciones** del uso conjunto de estas tecnologías son: generación de mapas temáticos de usos de suelo, vegetación, rocas, tipos de suelo o hidrología mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite, mapas de elevación; estudios sobre calidad

ambiental, evaluación de amenazas a riesgos naturales o antrópicos (inundaciones, deslaves, incendios, tormentas) y análisis de la explosión demográfica o industrial (Chuvienco, 2002).

3.0 Antecedentes

3.1 Sistema de información Geográfica Medio Ambiental SIGMA

- En 2010 Chico realizó un Sistema de Información Geográfica Medio Ambiental para el municipio de Tequixquiac, Estado de México. El *SIGMA de Tequixquiac* constituye una caracterización detallada del municipio, se compone por bases de datos de aspectos biológicos, físicos y socioeconómicos que permitieron la generación de mapas temáticos, la evaluación de la calidad de la vegetación, la evaluación del riesgo potencial de incendio y la propuesta de ubicación de un vertedero de residuos sólidos urbanos. Lo anterior con la finalidad de posibilitar una mejora en la gestión de los recursos naturales del área.
- En el 2011 Gutiérrez y colaboradores generaron el *SIG-Lerma* (para el municipio de Lerma en el Estado de México), el cual fue implementado desde el interior de la administración pública del municipio pretendiendo mejorar la prestación de servicios públicos: alumbrado público, seguimiento y evaluación de la recolección de los residuos sólidos urbanos municipales RSUM, obras públicas, entre otros.

3.2 Evaluación de cambio de usos de suelo y vegetación

- En 2002 Velázquez y colaboradores, realizaron un análisis del cambio de uso de suelo en México, apoyándose de los insumos cartográficos de INEGI y del Inventario Forestal Nacional Periódico, las temporalidades tomadas en cuenta para evaluar dicho cambio fueron: 1976, 1993 y 2000, se realizó una superposición cartográfica y un análisis estadístico del cambio (construcción de matrices de transición y estimación de las tasas de cambio). Los resultados sugieren una disminución general de los bosques y las selvas como producto de la deforestación (-1.02 y -2.06 %, respectivamente), así como la disminución de otras coberturas a consecuencia de la fragmentación de la vegetación: los pastizales naturales, vegetación hidrófila y matorral, por otra parte identificaron incrementos en las superficies de pastizal inducido (4.62%) y zonas de cultivos (1.96%).
- En el 2009 Pineda y colaboradores, publicaron un estudio acerca del cambio de uso de suelo en el Estado de México, en el período 1993-2002, para dicho fin realizaron una matriz de transición mediante la metodología de *Pontius et al., 2004* y la aplicación de modelos de regresión. Dentro de los principales hallazgos destacan la pérdida de los

bosques templados concretamente: 3, 836 ha de bosque de coníferas, 7, 295 ha de bosque de latifoliadas, 309 ha de bosque mesófilo de montaña o bosque de niebla y 2, 250 ha de bosque mixto, en total 13, 691 hectáreas perdidas. Los modelos sugirieron que las áreas más próximas a la actividad agrícola son aquellos con mayor fragilidad ecológica.

- En 2011 Alados y colaboradores realizaron la modelización de la matorralización de los pastos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido en España, contemplando factores biofísicos y antrópicos, así como su relación con el cambio global. Esta comparación se realizó con imágenes satelitales de 1989, 1998 y 2007, los resultados mostraron una progresiva reducción del pastizal alpino, cuya superficie fue colonizada por plantas leñosas, tanto forestales como arbustivas (matorralización), dichas pérdidas de cobertura se deben a la disminución del pastoreo, a la par de ésta transición vegetal se observó el aumento de la población de jabalí y “erizón”.
- En 2012 García y colaboradores, realizaron la identificación de los procesos de cambio de uso de suelo en la microcuenca del río San José, ubicado entre los municipios San Juan del Progreso y San José del Rincón, en el Altiplano Mexicano, el periodo de análisis fue entre 2000 y 2008. El cambio más significativo que hallaron fue la transición hacia usos de suelo antrópicos, particularmente la deforestación de zonas que fueron transformadas a agricultura de temporal.
- En 2014 Fuente, realizó un análisis del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Nervión en España y su relación con el riesgo de inundación, el análisis muestra que las inundaciones ocurren en la cuenca como parte de un proceso natural que siempre ha existido, sin embargo destaca que las pérdidas y afectaciones socioeconómicas se deben al mal uso y gestión del suelo en el área, haciendo énfasis en la ocupación antrópica del área inundable, asentamientos irregulares, impermeabilización del suelo, y mantenimiento inadecuado de canales, proponiendo además contemplar el uso de un drenaje que permita la convivencia entre el medio natural y el medio antrópico de la cuenca.

3.3 Zonificación del riesgo de inundación

- En 2010 Vera y López, evaluaron la amenaza por inundación en Iztapalapa, Ciudad de México en el periodo 1998-2005, contemplando factores biofísicos, realizando sobreposición cartográfica de variables y valoración de peso de éstas. Los resultados muestran que de las 17 colonias evaluadas, 8 tienen alto riesgo de inundación (6% al Este del territorio), lo anterior se debe principalmente a la distribución heterogénea de la lluvia, los hundimientos de suelo y el vertido público de desechos.
- En 2010 Toscana y colaboradores generaron un mapa de la zonificación del riesgo por inundación en San Mateo Atenco, Estado de México. Lo anterior empleando cartografía participativa, encuestas y entrevistas orales, ésta zonificación contrasta con los documentos oficiales como el Plan de Desarrollo Urbano y el Atlas de inundaciones municipal, que reportan superficies inundables menores, además de la zonificación se contemplaron factores socioeconómicos: ingresos, vivienda y educación.
- Díaz-Delgado y colaboradores en 2011, realizaron la estimación directa de los daños por las inundaciones en Chalco, Estado de México, apoyándose de la elaboración de curvas costos versus altura de lámina de agua alcanzada en las zonas habitacionales. El costo más probable estimado fue de 33.95 millones de pesos.
- En 2014 Mendoza y Orozco, realizaron un análisis multicriterio del riesgo biofísico por inundación en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), lo anterior partiendo de insumos cartográficos institucionales y datos de campo, ésta información fue procesada por métodos estadísticos y espaciales apoyados del uso de SIG y técnicas de percepción remota. Los resultado muestran que 1, 032. 73 km² o el 52.4% de la superficie está en riesgo alto (Lerma, Toluca, San Mateo Atenco y Metepec), 687.20 km² está en riesgo medio y 13.71 km² se encuentra en riesgo bajo.
- En 2016, Jordán realizó un análisis de la vulnerabilidad por inundación en Tenancingo, Estado de México, analizando factores socioeconómicos y la eficacia de Protección Civil en dicho municipio. Se identificación tres zonas de conflicto por inundación que anualmente se ven afectadas por dicho fenómeno y las cuales cuentan con registros históricos: zona A (cabecera municipal y barrio La trinidad); zona B (colonias 14 de marzo y San Mateo); zona C (colonias aledañas al río Atotonilco y Salado), se generó la

cartografía correspondiente y se contrastó con la información municipal del Atlas de Riesgo.

3.4 Identificación de puntos de conflicto actualmente empleados como vertederos clandestinos en el municipio y su relación espacial con el riesgo de inundación.

- En 2005 Rodríguez y Rebollar realizaron un modelo cartográfico para la selección primaria de zonas para construcción de vertederos de residuos sólidos urbanos (VRSU) y de manejo especial en el Valle de Toluca, Estado de México, lo anterior con base a la norma mexicana para sitios de disposición final de residuos NOM-083-SEMARNAT-2003, apoyándose del uso de SIG y realizando verificaciones en campo. El mapeo de aptitud territorial muestra zonas totalmente restringidas, sin restricción y aquellas que requieren estudios adicionales. Las zonas aptas se ubican principalmente en: Almoloya de Juárez, Jiquipilco y Villa Victoria.
- En 2010 Chico realizó una propuesta de modelo espacial matricial para la ubicación de un vertedero de residuos sólidos urbanos en Tequixquiac, Estado de México. Los criterios empleados para determinar la aptitud territorial fueron: pendientes, capacidad portante de las litologías, buffers de distancia a vías de comunicación, fallas geológicas, hidrología, núcleos urbanos, coberturas vegetales y usos de suelo municipales.

4.0 Justificación

Las inundaciones causan pérdidas humanas, económicas, problemas sanitarios, ambientales, y son frecuentes en zonas urbanas, por ello, es indispensable analizar el riesgo de que ocurran, como primera aproximación para facilitar la toma de decisiones en la planificación urbana, prevenir y reducir los daños causados por éstas.

Ecatepec es el municipio más poblado del Estado de México, el 99.9% de su población es urbana y las inundaciones en él son frecuentes, debido al inadecuado manejo de residuos y el riesgo ambiental del territorio por yacer en una zona lacustre (antiguo Lago de Texcoco). Además la inadecuada planificación urbana y los usos antrópicos del suelo, pueden contribuir a incrementar el riesgo de inundación, esto se ve agravado porque es un municipio con alto grado de marginación y la población es poco resiliente económicamente.

5.0 Objetivos

General

Analizar el riesgo de inundación en Ecatepec de Morelos, y la relación de éste con el cambio de uso de suelo municipal en 1996, 2007 y 2016.

Particulares

- Generar un Sistema de Información Geográfica Medio Ambiental SIGMA, para caracterizar biofísica y socioeconómicamente al municipio.
- Analizar el cambio de uso de suelo municipal durante los años: 1996, 2007 y 2016
- Zonificar el riesgo por inundación para cada año: 1996, 2007 y 2016.
- Identificar las zonas con vertederos clandestinos en el municipio y su relación espacial con el riesgo de inundación.

6.0 Área de estudio

6.1 Etimología del nombre

Ecatepec proviene de la palabra en náhuatl: Ehecatepétl que se descompone en: Ehécatl que significa dios del viento y de Tépetl que significa cerro, por lo cual se traduce como “Cerro del dios del viento” (INEGI, 2009).

6.2 Extensión territorial y localización

El municipio tiene una extensión de 15, 807. 95 ha, se ubica al Noreste del Estado de México. Colinda al norte con Tecámac, al sur con Nezahualcóyotl, al oeste con Tlalnepantla y la delegación Gustavo A Madero y al este con Acolman, Tezoyuca y Atenco, ver mapa 1 (INEGI, 2009). Ecatepec está formado por una ciudad: San Cristóbal, y ocho pueblos: San Pedro Xalostoc (lugar de cuevas arenosas); Santa Clara Coatitla (dónde abundan las serpientes); Santa María Tulpetlac (lugar de petates de Tule); Santa María Chiconautla; Santo Tomás Chiconautla; Guadalupe Victoria; San Isidro Atlahutenco y San Andrés de la Cañada. Además cuenta con 6 ejidos, 12 barrios, 163 fraccionamientos y 364 colonias (Ayuntamiento municipal, 2013)

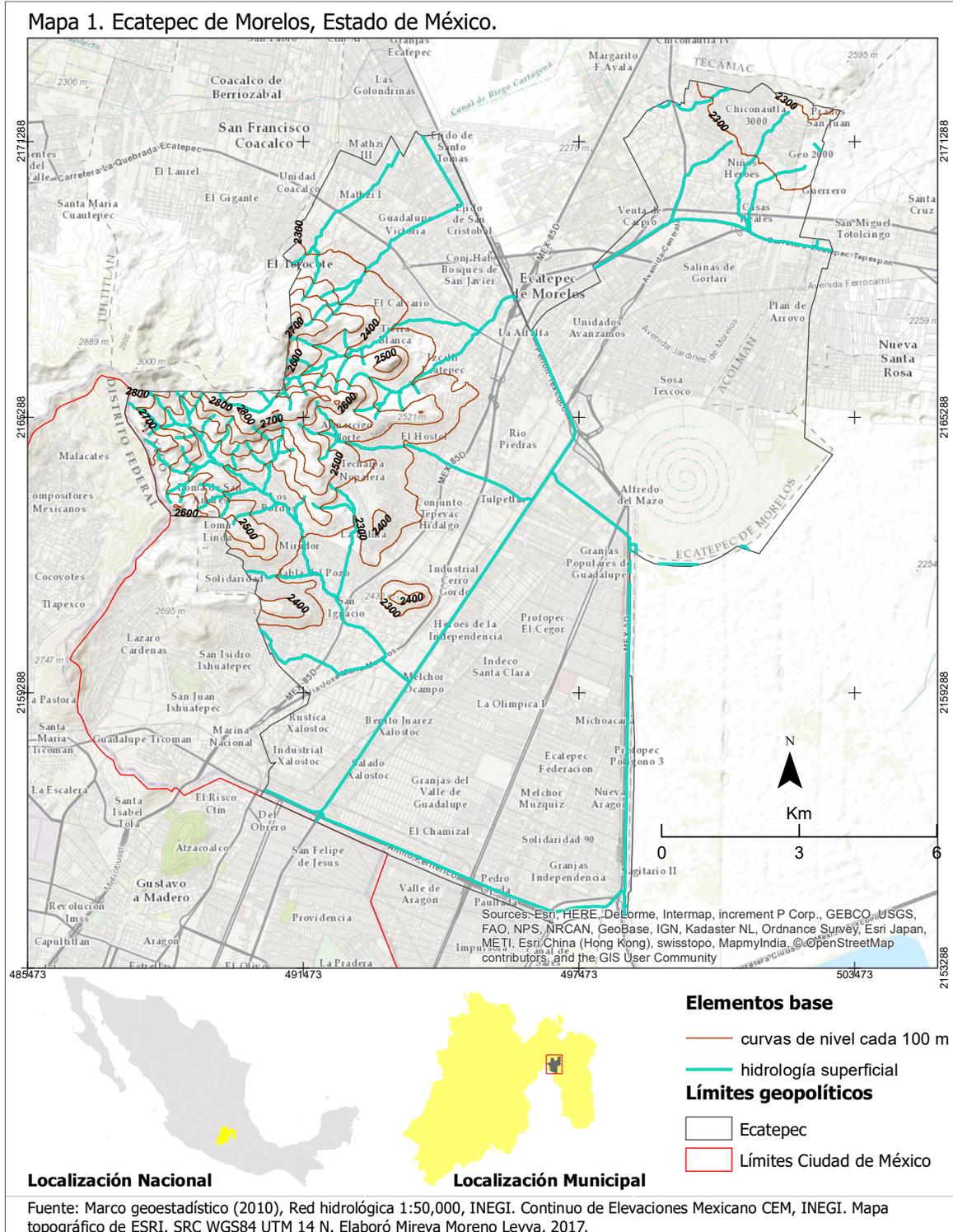
6.3 Características biofísicas

Fisiografía y clima, el municipio pertenece al eje neovolcánico (provincia fisiográfica) y a Lagos y volcanes del Anáhuac (subprovincia fisiográfica); la temperatura promedio oscila entre los 12 y 18 °C y las precipitaciones van de los 500-700 mm anuales, ver mapa 1 (Ayuntamiento municipal, 2013).

Geología y edafología, el territorio yace sobre unidades geológicas del Neógeno y el Cuaternario, posee rocas aluviales, lacustres, ígneas y sedimentarias. Los suelos dominantes son: Solonchak, Leptosol y Feozem (Ayuntamiento municipal, 2013).

Hidrología, pertenece a la red hidrográfica Pánuco, cuenca: río Moctezuma, subcuenca: Lago de Texcoco y Zumpango; Posee la corriente intermitente La Majada y corrientes superficiales de drenaje artificial: Río de los remedios, Gran Canal del Desagüe y Canal Las Sales, ver mapa 1 (Ayuntamiento municipal, 2013).

Usos de suelo y vegetación, el uso predominante es urbano e industrial. Los fines para agricultura y pastoreo pecuario son limitados por las características de productividad del suelo (Ayuntamiento municipal, 2013).



6.4 Historia

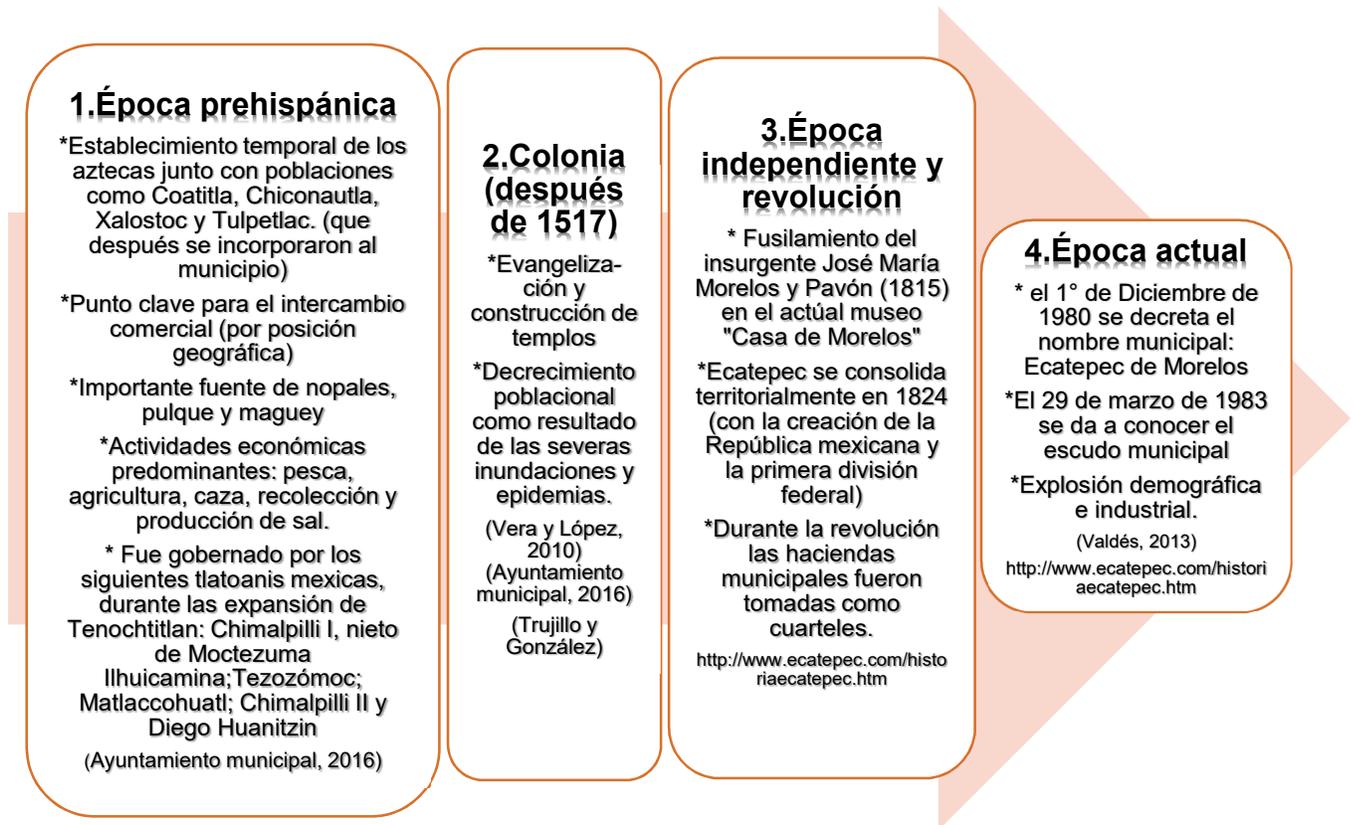


Fig. 16. Resumen histórico de Ecatepec, elaboración propia

6.4.1. Época prehispánica

Antes de la llegada de los españoles al continente, en Ecatepec se dieron varias inmigraciones de civilizaciones mesoamericanas que se fueron asentando, hasta la llegada del imperio azteca (también conocido como imperio mexica o tenochca), el cual se expandió controlando la mayor parte de la economía y política del Valle de México. Debido a su ubicación geográfica, el municipio fue punto clave para el control de las rutas comerciales, dentro de las actividades económicas de la población figuraban la pesca, agricultura, recolección, producción de nopal, maguey y pulque (Ayuntamiento municipal, 2016). Además, al yacer sobre el antiguo Lago de Texcoco (punto final de escorrentía de la cuenca), era un importante productor de sal, ya que el agua iba acarreado grandes cantidades de sal en su trayecto, y el lago era salobre (Ezcurra, 1990), *ver figura 16*.

6.4.2. Época colonial

Después de la llegada de los españoles, en el siglo XVI, Ecatepec recibió el nombramiento de Alcaldía mayor y Chiconautla el de corregiduría, este orden de poder político se mantuvo durante todo el periodo colonial, teniendo bajo su dominio a los actuales municipios de Tecámac y Coacalco. También ocurrió la progresiva evangelización de los pueblos hacia la religión católica acompañada de la construcción de templos, *ver figura 16* (Ayuntamiento municipal, 2016).

Históricamente se tiene registro de diversas inundaciones en la cuenca de México, dentro de las más desastrosas están las ocurridas entre 1519 y 1555, a consecuencia de éstas se propagaron epidemias que causaron una reducción en la población, por lo que apartir de 1555 comenzó la construcción del drenaje profundo de la Ciudad de México, con el Albaradón de San Lázaro (Perló, 1999 en Vera y López, 2010), después de 1604 a 1629 ocurrieron inundaciones severas, la de 1629 se prologó hasta 1635, por lo que se considera la más grave que ha sufrido la ciudad, ya que causó pérdidas humanas, enfermedades y el abandono de la ciudad. Por lo que entre 1521 y 1650 hubo una disminución drástica de la población (el 80% aproximadamente) en toda la Nueva España, debido a las epidemias de viruela y tifoidea, *ver figura 16* (Trujillo y González).

En el curso de éstos hechos Enrico Martínez presentó el primer proyecto para drenar la Cuenca “El desagüe de Huehuetoca”, obra que se terminó hasta 1900, sin embargo debido al hundimiento del suelo (subsistencia) las obras hidráulicas perdieron eficacia y continuaron las inundaciones en 1925, en 1965 finalizó la construcción del drenaje profundo y en 2006 se creó el Tunel de los Remedios con el objetivo de reducir las inundaciones al este de la ciudad, *ver figura 16* (DGCOH en Vera y López, 2010).

6.4.3. Época independiente y revolución

Después de la independencia mexicana en 1810, el sacerdote José María Morelos y Pavón, comenzó una vida política, en la que desempeño campañas y una obra en la que refleja su pensamiento con sentido crítico y social “La constitución de Apatzingán” en 1813, la cuál decreta la independencia de México ante España, así como la igualdad entre criollos, mestizos, indígenas, españoles y todas las castas, *ver figura 16* (Ayuntamiento municipal, 2016).

Dos años después de ese acto (1815), fue fusilado en el actual museo “Casa de Morelos”, acusado de abandono de su doctrina religiosa y de “herejía” por rebelarse ante el régimen español, más tarde en 1824, con la creación de la República mexicana y la primera división federal, el municipio se consolida territorialmente. En 1910 durante la revolución mexicana, las haciendas del municipio fueron usadas como cuarteles, *ver figura 16* (Ayuntamiento municipal, 2016).

6.4.4. Época actual

En 1980 el municipio adopta el nombre de Ecatepec de Morelos, en honor al insurgente y el 29 de marzo de 1983 se da a conocer el escudo con el lema: autonomía, trabajo y unión, en la parte superior luce la bandera, debajo de esta está la constitución política del país simbolizando autonomía, a la izquierda se encuentra la parroquia de San Cristobal, a la derecha tierras agrícolas simbolizando el trabajo y en la parte inferior la cuenca del valle de México representando la unión, al centro se observa el rostro de José María Morelos y Pavón, emblemático del municipio, *ver figura 17* (Ayuntamiento, 2016).



Fig. 17. Escudo de Ecatepec de Morelos

Por su parte, el glifo es la cabeza de un ave, haciendo referencia al dios del viento Ehécatl-Quetzalcóatl, esta cabeza está sobre un cerro. Según los mitos aztecas el dios de la dualidad Ometéotl utilizó el viento divino Ehécatl para soplar sobre el caos y ordenar el universo, creando luz y movimiento (Quetzalcóatl) (Ayuntamiento municipal, 2016). *Ver figura 18:*



Fig. 18. Glifo de Ecatepec de Morelos

Después de la década de los noventas hubo una notable explosión demográfica en el municipio, para el censo de 2010 ésta ascendió a 1, 656, 107 millones de habitantes, siendo el más poblado del Estado de México y el segundo más poblado del país (después de Iztapalapa), además se consolidó como unidad industrial (INEGI, 2010).

7.0 Materiales y métodos

7.1 Caracterización socio-ambiental y elaboración de mapas temáticos (SIGMA)

El SIGMA se elaboró en el *software ArcView 3.1* y los mapas temáticos en *Arc Map 10.1*, a partir de los insumos cartográficos (archivos ráster y vectoriales) obtenidos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA). Toda la información se trabajó bajo un sistema de referencia Universal Transversal de Mercator UTM con Datum WGS84, para la zona 14 Q Norte.

Los subsistemas que lo integran son:

7.1.1 Subsistema biofísico

Elevación, pendiente y orientación, el Modelo Digital de Elevación (MDE), es una representación visual y numérica de la geomorfología del terreno, que permite caracterizar el relieve de un área determinada (INEGI). El MDE del terreno se obtuvo del Continuo de Elevaciones Mexicano CEM del INEGI, las cartas empleadas fueron: e14a29, e14a39, e14b21 y

e14b31, éstas fueron obtenidas en formato ráster (geotiff) en coordenadas geográficas y resolución espacial de 15 metros, por lo que fueron unidas y proyectadas al sistema de referencia UTM, en el software *QGIS 2.2*, posteriormente se obtuvo la elevación en m.s.n.m del municipio, se le derivó la pendiente y la orientación, con esta información se elaboraron los mapas correspondientes.

Los mapas temáticos de **geología** y **edafología** se generaron a partir de las cartas de INEGI, edición 1976 y 1982, respectivamente: e14a29, e14a39, e14b21y e14b31 a escala 1:50,000, las cuales se transformaron de formato PDF a JPG, se recortaron, georeferenciaron y digitalizaron los polígonos correspondientes para obtener los datos vectoriales (en el portal de INEGI sólo se encuentra disponible la información vectorial a escala 1: 250 000).

Hidrología superficial: Los datos vectoriales de corrientes, se obtuvieron de la red hidrográfica a escala 1:50 000 de INEGI, los cuales fueron reproyectados del sistema de referencia de coordenadas cónicas conforme de Lambert a UTM y recortados al área municipal.

Capacidad de micro-cuencas: Fueron delimitadas en el software *ArcMap 10.1* a partir de la elevación del terreno.

Las capas de **uso de suelo y vegetación** para los años: 1996, 2007 y 2016 se obtuvieron a partir de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat 5 y 8. Las imágenes para dicho fin fueron obtenidas en formato Geotiff, con resolución espacial de 30 metros y temporal de: 1996-05-21; 2007-09-25 y 2016-05-28, fueron descargadas del visualizador global del registro geológico de los Estados Unidos de América (USGS- GLOVIS), dirección electrónica: <https://glovis.usgs.gov/>

7.1.2 Subsistema climático

Elaborado a partir de las normales climatológicas mensuales y anuales de 69 estaciones meteorológicas para evaporación y 98 para: temperatura mínima, media, máxima y precipitación. Con estos datos se realizaron interpolaciones para el municipio, debido a la carencia de estaciones meteorológicas en el área.

Las interpolaciones de datos climáticos se realizaron por el método IDW por sus siglas en inglés, conocido como método de Distancia Inversa Ponderada, el cual estima valores (en éste caso: precipitación, evaporación y temperatura), en un área ráster determinada partiendo de los valores promedio de los puntos cercanos (las estaciones meteorológicas circundantes), cuanto

más cerca estén éstas de las celdas a estimar mayor peso o ponderación tendrán sus datos meteorológicos en el cálculo de los promedios (Watson y Philip, 1985).

7.1.3 Subsistema socioeconómico

Este subsistema se integró por los siguientes indicadores sociales a nivel local: población total, población de 0 a 14 años, población mayor de 65 años, población con algún tipo de discapacidad o limitación física, población económicamente activa PEA, grado de marginación, grado de rezago social, carencia al acceso de servicio de salud. En conjunto, estas variables fueron integradas a través de matrices para obtener un estimado de la **resiliencia social** de la población. La ubicación y distribución de las localidades en el municipio se obtuvieron del censo de vivienda y población de INEGI de 2010, posteriormente se realizó una interpolación de proximidad por el método de voronoi o polígonos de Thiessen y se generó una base de datos integrando los indicadores antes mencionados.

El método de interpolación de voronoi es apropiado para datos cualitativos y fenómenos no continuos, se basa en la distancia ordinaria o euclidiana entre puntos (en éste caso la proximidad entre localidades). Consiste en la unión de los puntos y el trazo de las mediatrices de los segmentos resultantes cuya intersección forma en sí los polígonos (Rodríguez, 2013).

7.2 Evaluación del cambio de uso de suelo y coberturas vegetales

La evaluación del cambio de uso de suelo municipal se realizó mediante una clasificación supervisada en *Arc Map* 10.1. Las imágenes de las bandas espectrales para cada sensor, fueron descargadas del del visualizador global del registro geológico de los Estados Unidos (USGS GLOVIS) dirección: <https://glovis.usgs.gov/>, 8 bandas para el sensor Landsat 5, ver resolución espectral en cuadro 3 y 11 bandas para Landsat 8, ver resolución espectral en cuadro 4, todas con resolución espacial de 30 metros y temporal de: 1996-05-21, 2007-09-25 y 2016-05-28, respectivamente. La escena empleada fue la situada en la latitud 20.2 y longitud -98.8. Para el análisis se tomaron en cuenta los años: 1996, 2007 y 2016, por lo que la información provenía de los sensores Landsat 5 y 8. Las composiciones de bandas empleadas para generar las imágenes a clasificar fueron: 2 4 5 (para 1996 y 2007) y 3 5 6, para el 2016. En el cuadro 5 se muestran estas composiciones de bandas y lo que permiten visualizar:

Cuadro 5. Composición espectral de las imágenes empleadas para la clasificación supervisada y características de cada banda.

LANDSAT TM 5 (1996 y 2007)		LANDSAT 8 (2016)	
Composición / Bandas	Coberturas que distingue	Composición / Bandas	Coberturas
2- Verde (0.52-0.60 μm)	Vegetación y calidad del agua	3- Verde (0.53-0.59 μm)	Vegetación y cuerpos de agua.
4-Infrarrojo cercano 1 (0.76-0.90 μm)	Coberturas vegetales, humedad, geología, geomorfología, incendios, agricultura, cuerpos de agua.	5-Infrarrojo cercano (0.85-0.88 μm)	Coberturas vegetales y humedad.
5-Infrarrojo cercano 2 (1.55-1.75 μm)		6-Infrarrojo de onda corta SWIR1 (1.57-1.65 μm)	Recursos hídricos, nubes y nieve.

Información tomada de: http://gsp Peru.com/pdf/res_landSAT7etm.pdf y del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América USGS, consulta en línea: <http://vinnyssig2014.blogspot.mx/2015/09/landsat-8-bandas.html>

Es importante mencionar que originalmente se tenía contemplado realizar las clasificaciones para las décadas 1996, 2006 y 2016, sin embargo se cambió la temporalidad intermedia a 2007 debido a que las imágenes del satélite Landsat 7 para el año 2006 tienen errores, ya que a partir del 2003 el sensor tiene dañado el sistema SLC (responsable del movimiento), lo que produce un zigzagueo y un efecto gap o de bandeo en las imágenes, éste puede corregirse, pero, no se contó con el software para dicho fin (información disponible en Ramos *et al.*, 2009).

La clasificación supervisada consiste en asignar a cada píxel de la imagen una categoría de uso de suelo o cobertura vegetal con la finalidad de generar un mapa temático, lo anterior partiendo del conocimiento previo del área de estudio, esta información de referencia está contenida en una base de datos de coberturas, conocida como *sitios de entrenamiento* (Eastman, 2012), puntos geográficos tomados en campo aleatoriamente con un sistema de geo-posicionamiento global GPS (*Garmin eTrex® 10*) y utilizando como apoyo: el mapa base de ESRI, *Google earth* y la consulta de imágenes históricas. Se tomaron 3, 627 puntos para 1996, 8, 873 para 2007 y 1, 433 (de los cuales 52 fueron tomados en campo con un Sistema de Geoposicionamiento Global GPS y corregidos en *Google earth*) para 2016.

Con esta información de referencia se realizó una clasificación de los píxeles de toda la imagen asignándoles una categoría con base a las firmas espectrales de los mismos (valores de reflexión, transmisión y absorción de la luz del sol específicos para cada cobertura), esta

asignación se realiza mediante un método estadístico o método clasificador, el más empleado dada su eficiencia es el **método de máxima verosimilitud** o (MAXLIKE MLE-*Maximum likelihood estimation*), este método asume que la distribución de los histogramas de las bandas espectrales de los sensores es “normal” o igual a uno, es decir que cada píxel pertenece a una sola categoría por lo que es un clasificador rígido (distinto de los “blandos” porque estos pueden indicar más de una cobertura por píxel y sus respectivas probabilidades) (Eastman, 2012).

El proceso de clasificación puede tener algunos errores de omisión (píxeles excluidos) o errores de comisión (píxeles que son incluidos en una categoría errónea), por esta razón se realizó una **matriz de confusión** (*ver figura 19*), que es una matriz de doble entrada en la que se contrasta la concordancia entre la categorización del territorio real o sitios de entrenamiento (entrada horizontal) y la clasificación (entrada vertical), en la diagonal principal están los píxeles clasificados correctamente, los marginales superiores son los errores de omisión (píxeles no clasificados), los marginales inferiores muestran los errores de comisión (píxeles clasificados en una categoría errónea). La fiabilidad del productor, es el porcentaje de fiabilidad con respecto a los errores de omisión (porcentaje de píxeles correctamente clasificados con respecto a los totales de cada fila); La fiabilidad del usuario, es el porcentaje de fiabilidad con respecto a los errores de comisión (porcentaje de píxeles correctamente clasificados con respecto a los totales de cada columna). Además, el cálculo de ésta permite estimar el índice de precisión global y el coeficiente Kappa, estadísticos que muestran el porcentaje de fiabilidad que tuvo la clasificación (López y Pita, 2001).

El **índice de precisión global**, permite hacer una estimación general de la fiabilidad de la clasificación, por lo que no refleja la exactitud que existe para cada categoría. Se calcula sumando la cantidad de píxeles correctamente clasificados (diagonal en la matriz de confusión), dividiendo el resultado entre el total de píxeles de referencia y multiplicándolo por cien (expresión en porcentaje)

$$I. \text{Precisión Global} = \left(\frac{\sum \text{píx. correctamente clasificados}}{\text{Total de píx. de referencia}} \right) 100$$

Por su parte, **el coeficiente Kappa** es un estadístico empleado para datos categóricos o cualitativos, que mide la concordancia que existe entre dos observadores al clasificar N elementos en categorías, en este caso la concordancia entre la clasificación hecha por un clasificador automático y la información de referencia o sitios de entrenamiento (López y Pita, 2001).

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total	%	%
Uso	ZU	-	PH	CA	AR	AT	VHH	SVA	VU	PI	FOR	MAT	Total	Fiabilidad del productor	Error de omisión
ZU	656	0	3	1	1	9	13	0	3	0	0	0	686	95.63	4.37
I	0	65	0	9	13	0	0	0	1	0	0	1	89	73.03	26.97
PH	15	0	27	6	0	0	0	0	0	0	0	0	48	56.25	43.75
CA	0	10	2	20	15	0	2	0	0	0	0	0	49	40.82	59.18
AR	4	3	0	2	54	0	20	0	1	1	0	1	86	62.79	37.21
AT	6	0	0	0	1	168	1	0	0	0	0	0	176	95.45	4.55
VHH	14	0	0	0	17	0	42	0	2	0	0	0	75	56.00	44.00
SVA	1	0	0	1	0	0	0	20	0	1	0	0	23	86.96	13.04
VU	26	1	0	0	10	1	13	0	19	0	0	0	70	27.14	72.86
PI	0	2	0	0	5	0	1	1	0	15	0	1	25	60.00	40.00
FOR	9	0	0	0	1	0	13	0	3	0	6	0	32	18.75	81.25
MAT	0	6	0	0	2	0	0	0	0	2	0	18	28	64.29	35.71
total 1387	731	87	32	39	119	178	105	21	29	19	6	21	1110	61.43	38.57
Fiabilidad del usuario %	89.74	74.71	84.38	51.28	45.38	94.38	40.00	95.24	65.52	78.95	100.00	85.71	75.44	Fiabilidad global	80%
Error de comisión n%	10.26	25.29	15.62	48.72	54.62	5.62	60.00	4.76	34.48	21.05	0.00	14.29	24.56	Coefficiente Kappa	0.72

N= Total de píxeles

xi c= cada total en las columnas

xi f= cada total en las filas

Σ xii = sumatoria diagonal

Fig. 19. Elementos en la matriz de confusión para calcular el coeficiente Kappa

Dónde:

N = total de observaciones incluidas en la matriz (total de píxeles)

Σ xii= sumatoria de píxeles clasificados correctamente (diagonal de la matriz) o concordancia entre observadores (clasificación vs sitios de entrenamiento)

xi f = total de observaciones en las filas (total marginal a la derecha de la matriz)

xi c= total de observaciones en las columnas (total marginal inferior en la matriz)

* La multiplicación de estas dos últimas expresiones arrojan la probabilidad hipotética de acuerdo entre observadores por azar

La fórmula para calcular el coeficiente kappa es la siguiente, la valoración del mismo se muestra en el cuadro 6 y cada uno de los elementos en la matriz de confusión que sirven para calcularlo, en la figura 19:

$$C. Kappa = \frac{N \sum xii - \sum(xi f \times xi c)}{N^2 - \sum(xi f \times xi c)}$$

La estimación de éste coeficiente va de 0 a 1 y puede interpretarse como se observa en el cuadro 6:

Cuadro 6. valoración del coeficiente Kappa.Tomada de: (López y Pita, 2001)

Valor de K	Fuerza de la concordancia
< 0.20	Pobre
0.21 – 0.40	Débil
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Buena
0.81 – 1.00	Muy buena

Para analizar de manera más concreta la dinámica de cambio en el uso de suelo, se construyó una **matriz de transición**, se elaboró con base a la metodología propuesta por *Pontious et al. 2004* citada en *Silva y Rubio, 2014*.

Consiste en realizar una tabulación cruzada de las capas temáticas de uso de suelo y vegetación obtenidas en la clasificación supervisada para dos años diferentes, contrastándolas y permitiendo estimar las persistencias en las coberturas, los cambios, cuántas hectáreas cambiaron de uso y hacia que categoría cambiarion, pérdidas y ganancias. En este caso se construyeron 3 matrices: 1996 vs 2007, 2007 vs 2016 y 1996 vs 2016. En la figura 20, se muestran los elementos de la matriz de transición:

USO / COBERTURA	NU	-	PH	CA	AR	AT	VHH	SV	VU	PI	F	M	TOTAL 2007	PÉRDIDAS
zona urbana	7254.09	230.85	53.64	54.09	67.32	89.64	89.64	30.78	128.52	34.92	1.89	8.73	8044.11	790.02
industrial	117.18	65.61	18.45	2.88	16.92	3.6	5.49	45.36	3.69	1.08	0.36	2.07	282.69	99.9
pastizal halófilo	445.41	4.77	117.54	4.32	26.91	12.15	21.42	22.95	56.43	17.28	4.95	27.27	761.4	193.68
cuerpo de agua	38.52	4.32	16.74	42.93	3.6	3.78	14.76	15.03	2.07	0.36	0.63	1.89	144.63	42.12
agricultura de riego	426.96	3.6	10.35	0.99	598.5	52.29	6.57	0.72	9.72	4.95	10.8	2.43	1127.88	87.48
agricultura de temporal	641.52	10.98	159.93	5.13	151.74	601.74	58.32	25.56	63.18	27.63	27.18	4.77	1777.68	206.64
vegetación halófila hidrófila	42.3	1.8	6.21	9.99	29.79	63.72	31.41	1.08	6.57	1.89	1.26	13.77	209.79	24.57
sin vegetación	82.8	10.08	102.15	10.53	10.62	4.14	14.49	455.13	5.04	3.96	0	0	698.94	9
vegetación urbana	236.07	4.86	105.21	9.54	48.96	31.5	38.25	13.14	105.57	47.43	105.3	18.54	764.37	171.27
pastizal inducido	155.34	2.25	53.73	1.62	19.26	23.13	18.99	1.62	16.02	16.74	78.3	148.14	535.14	226.44
forestal	53.46	0.72	82.98	1.17	8.37	13.95	6.93	0.09	14.13	16.11	454.14	234.99	887.04	234.99
matorral	7.29	0.18	9.72	0.09	1.17	1.26	10.17	0.09	0.63	2.52	85.32	394.92	513.36	118.44
TOTAL 1996	9500.94	340.02	736.65	143.28	983.16	900.9	316.44	611.55	411.57	174.87	770.13	857.52	10138.32	2086.11
GANANCIAS	2246.85	43.56	547.02	39.06	269.91	137.7	88.83	14.94	30.78	18.63	85.32	462.6	3522.6	

Pérdidas en ha

Persistencias

Ganancias en ha

Fig. 20 Elementos de la matriz de transición, cada casilla muestra las ha que cambiaron de uso y a que pasaron.

7.3 Zonificación del riesgo de inundación

El modelo espacial contempla las *variables ambientales*: pendiente, geología, edafología, usos de suelo, coberturas vegetales, hidrología superficial, precipitación y evaporación (medias anuales), capacidad de microcuencas, calles (densidad de calles calculada por el método de Kernel), éste método para calcular densidades es útil cuando los datos son cualitativos, no tienen un patrón de distribución normal, exponencial o no se ajustan a las técnicas de análisis estadístico rígido como el tamaño muestral (es una técnica estadística no paramétrica). En el cálculo de densidad simple los elementos que caen dentro de un área son sumados y divididos por la superficie de la misma, el cálculo de densidad por método de Kernel opera de forma similar aunque dando mayor peso a los elementos que están más cerca del radio de interés, (en éste caso se utilizó un radio de 500 metros) (Moreno, 1991). *La resiliencia social*, se compone por los indicadores sociales del subsistema socioeconómico (ver apartado 7.1), la evaluación del riesgo de inundación se realizó para las tres temporalidades de la clasificación supervisada (1996, 2007, 2016), esto con la finalidad de observar su relación con el cambio en los usos del suelo y las coberturas vegetales con dicho fenómeno. La integración matricial de variables se muestra en la *figura 21*, se realizó con el *método modificado de Chico y Montoya, 2011*.

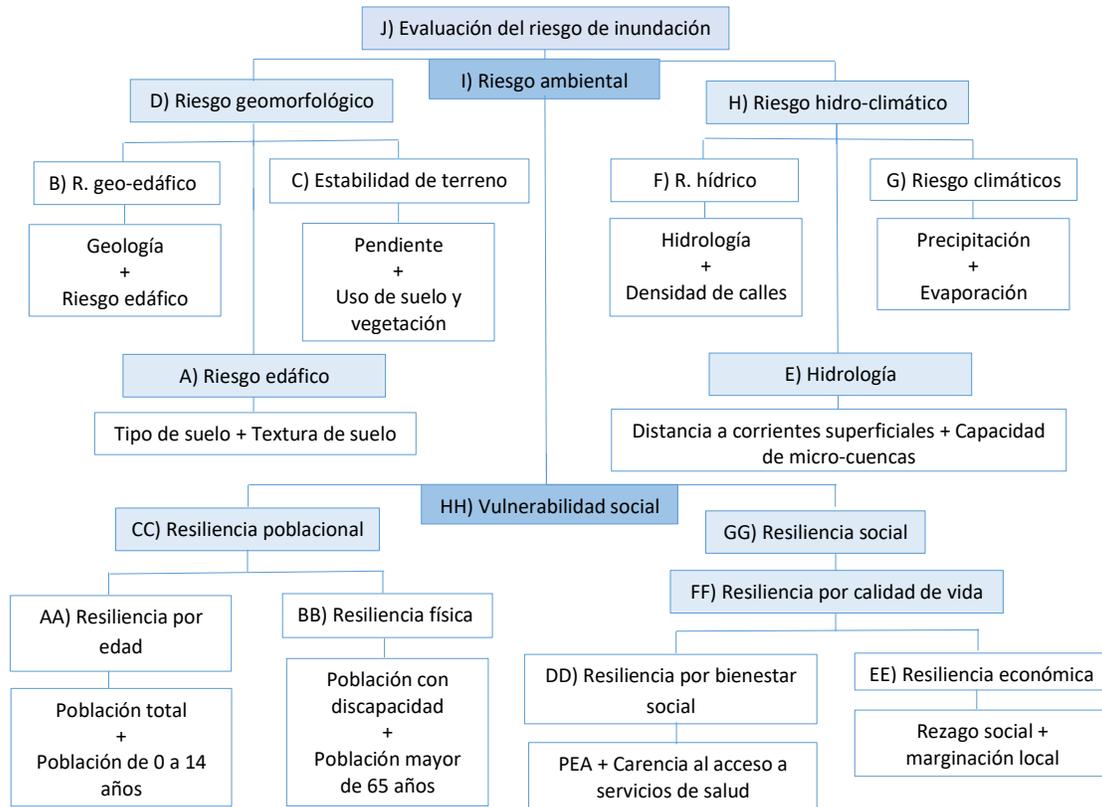


Fig. 21 Propuesta del modelo espacial para la zonificación del riesgo de inundación en Ecatepec.

Las variables ambientales se categorizaron en riesgo: 1: bajo; 2: medio; 3: alto y 4: muy alto, mientras que los indicadores sociales en resiliencia: 1: baja; 2: media; 3: alta y 4: muy alta, posteriormente se reclasificó a una capa booleana: 0: población no vulnerable y 1: población vulnerable.

La clasificación variables y los criterios empleados en cada integración, se muestran en el cuadro 7:

Cuadro 7. Clasificación de variables ambientales y sociales para la zonificación del riesgo de inundación			
Matrices	Criterio de clasificación	Clases o categorías de riesgo 1 bajo, 2 medio, 3 alto, 4 muy alto	
A) Riesgo edáfico	Aquellos suelos con texturas finas, de origen aluvial y altas cantidades de sales tenderán a tener una velocidad de filtración menor (Anegables), así mismo las zonas urbanas propiciarán la impermeabilización del suelo por acción del asfalto y la pérdida progresiva de la cobertura vegetal.	Tipo de suelo 1: Leptosol, rendzina 2: Feozem 3: Solonchak	Textura 1: Gruesa 2: Media 3: Fina
B) Riesgo geo-edáfico	Los suelos anegables en combinación con rocas poco porosas, provocaran drenaje y permeabilidad deficiente.	Tipos de roca 1: Ígneas extrusivas 2: Sedimentarias. 3: Aluviales y lacustres	
C) Estabilidad del terreno	Las zonas con pendientes bajas o zonas planas tienden a inundarse con más facilidad, ya que no permiten la escorrentía pluvial, esto empeora si están desprovistas de vegetación, ésta es hidrófila o son zonas urbanas.	Pendiente y USV 1: 35- 55 ° Matorral y uso forestal 2: 15- 35° Agricultura de riego, de temporal, pastizal inducido, y vegetación urbana 3: 0-15 ° zonas sin vegetación, zona urbana, industrial, pastizal halófilo, corrientes de agua,y vegetación halófila hidrófila	
D) Riesgo geomorfológico	Riesgo geo-edáfico + Vulnerabilidad por estabilidad del terreno La evaluación de la vulnerabilidad a inundación del terreno con base a su geomorfología, toma en cuenta las características geológicas, edafológicas, inclinación, uso de suelo y vegetación del mismo.		
E) Hidrología	Zonas cercanas a cuerpos o corrientes de agua son más susceptibles a inundarse, por otra parte entre menor sea la capacidad o superficie que formen las micro-cuencas en dicha zona, el riesgo de inundación incrementa.	Distancias a hidrología 1.- Entre 2 y 3 km 2: 1 y 2 km 3: A una distancia menor o igual a 1 km	Capacidad de micro-cuencas 1.- 2000-9000 ha 2.- 1000-2000 ha 3.- < 1000 ha
F) Riesgo hídrico	Zonas con los rasgos hidrológicos categorizados como riesgosos anteriormente y que además cuenten con alta densidad de calles, favorecen la acumulación de agua al interior de las mismas, lo cual empeora por el drenaje artificial deficiente que hay en el municipio	Densidad de calles (Kernel) 1.- 0 - 0.014 2.- 0.014 - 0.027 3.- 0.027 - 0.041	
G) Riesgo climático	Precipitaciones fuertes, incrementan el riesgo de desborde de ríos y canales, esto aunado a índices de evaporación bajos, favorece la acumulación de agua en focos de riesgo.	Precipitación y evaporación 1: 553- 590 mm; 1700-1900 2:590-600 mm ; 1600-1700 3: 600- 700 mm ; 1522-1600	
H)	Riesgo hidroclimático: Riesgo hídrico + riesgo climático		
I)	Riesgo ambiental de inundación: Riesgo geomorfológico + riesgo hidroclimático Resiliencia= Clases: 1= Baja 2= Media 3= Alta 4= Muy alta		
AA) Resiliencia por edad	La capacidad de respuesta y planificación de la población ante una inundación incrementa mientras más miembros haya en la comunidad, aquellos individuos con edad entre 0 y 14 años	Población total 1: 0 – 100, 000 hab. 2: 100,000-200,000 hab. 3: 200,000- 1, 656,107	Población de 0- 14 años 3: 0 – 100, 000 hab. 2: 100,000-200,000 hab. 1: 200,000- 1, 656,107

		hab.	hab.
BB) Resiliencia física	La habitantes con alguna limitación física o en la senectud, son vulnerables ante un desastre, debido a que a menudo dependen de terceros.	Población discapacitada 4: 1 - 15, 000 hab. 3: 15, 000 – 31, 000 hab. 2: 31,000-47,000 hab. 1: 47,000- 70,000 hab.	Población mayor de 65 años 4: 3 – 20, 000 hab 3: 20, 000 – 40, 000 hab 2: 40,000- 60,000 hab 1: 60,000- 90,000 hab
CC) resiliencia poblacional = Resiliencia por edad + resiliencia física			
DD) Resiliencia por bienestar social	La seguridad económica y el acceso a servicios de salud pública gratuitos son derechos humanos, cuyo incumplimiento vulnera a la población ante riesgos sanitarios producidos por una inundación	Población económicamente activa PEA 1: 4- 180,000 hab 2: 180,000-350,000 hab 3: 350,000- 550, 000 hab 4: 550,000 -700, 000 hab	Carencia al acceso a servicios de salud 4: 5-170, 000 hab 3: 170, 000-350,000 hab 2: 350,000-600,000 hab 1: 600,000-700,000 hab
EE) resiliencia económica		Rezago y marginación local 4: Muy bajo 3: Bajo 2: Medio 1: Alto	
FF) Resiliencia por calidad de vida= resiliencia por bienestar social + resiliencia económica =			
GG) Resiliencia social = CC) resiliencia poblacional + FF) resiliencia por calidad de vida			
Reclasificación de resiliencia social (GG) en HH) Vulnerabilidad social (0- no vulnerable y 1- vulnerable)			

Matrices de integración:

La integración de variables ambientales y sociales (clasificadas con base al cuadro 7), se llevó a cabo mediante matrices de doble entrada, en la figura 22, se muestra una breve explicación de estas:

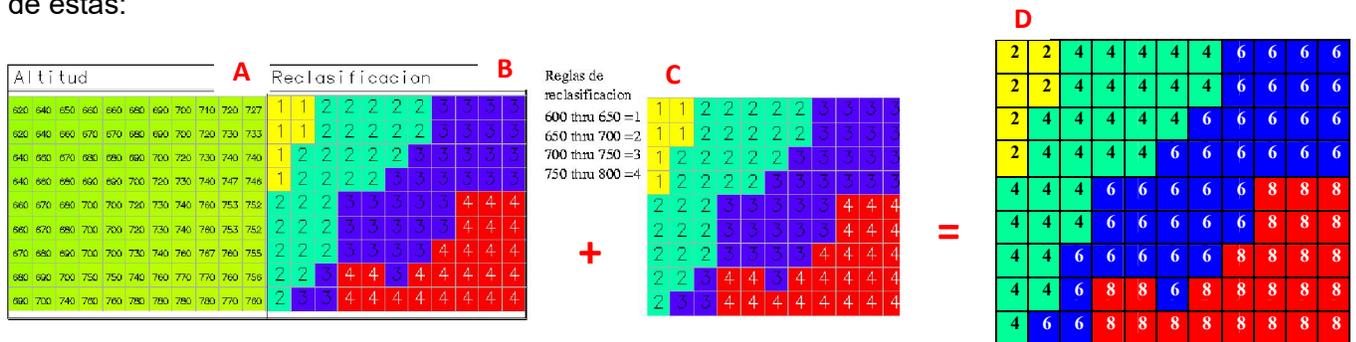


Fig. 22. Explicación de la integración de variables, *método modificado de Chico y Montoya, 2011*. Imagen A, B y C, tomada de: http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node35_ct.html

La variable 1 (altitud), es reclasificada a categorías de riesgo (1=bajo, 2=medio, 3=alto, 4=muy alto), para generar la capa B, posteriormente ésta capa (1reclass) se integra con la variable 2 (ya reclasificada), para obtener capa D, los resultados de la adición están en la variable 3, la cual se reclasifica a las categorías de riesgo (el 2 a 1, el 4 a 2, el 6 a 3, y el 8 a 4).

La integración de variables de la A a la FF, se muestra en la figura 23, y la integración de vulnerabilidad social más riesgo ambiental, para obtener el riesgo total de inundación se muestra en la figura 24.

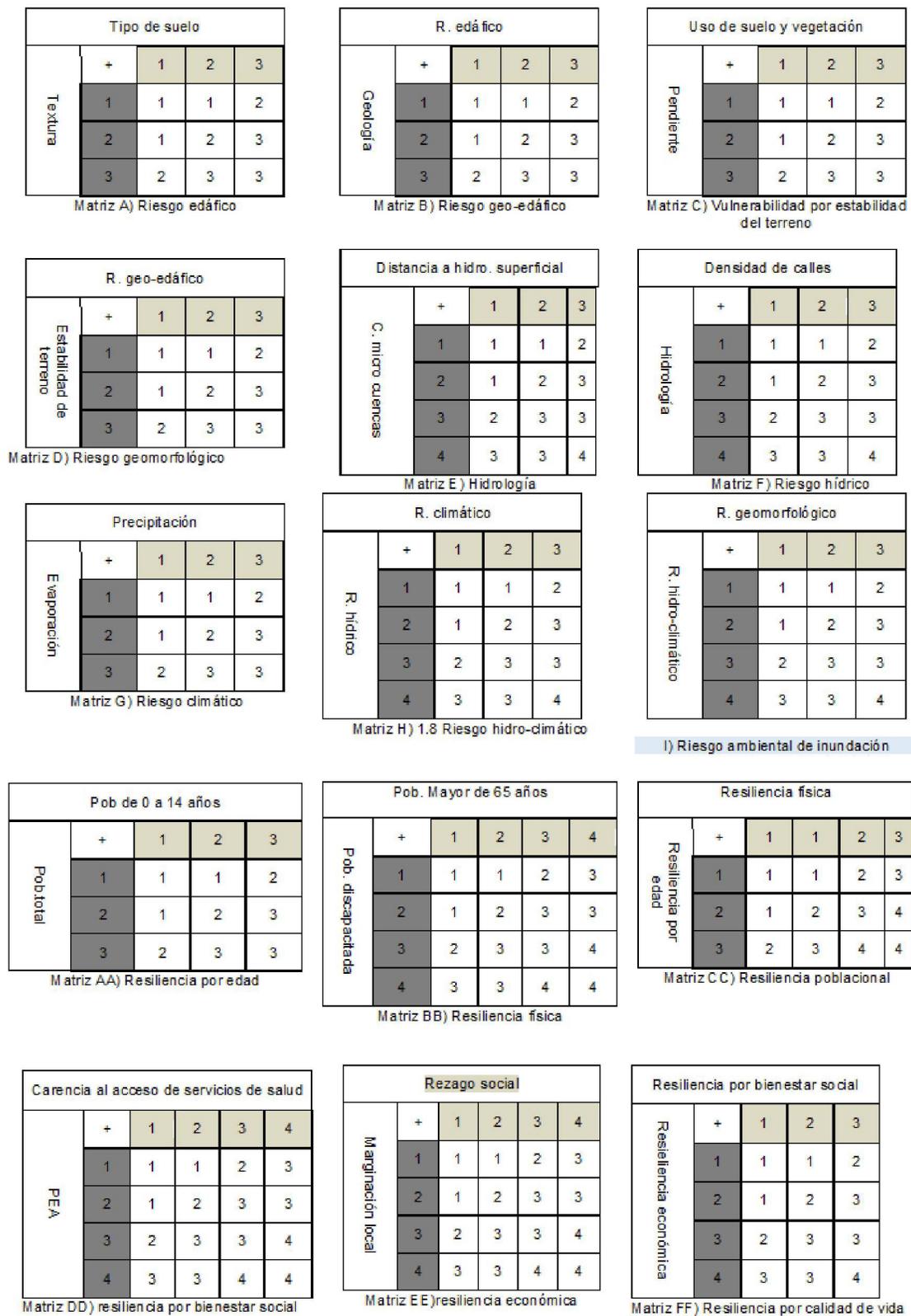


Fig. 23 Integración de variables de la A a la FF

Resiliencia por calidad de vida					
Resiliencia poblacional		1	2	3	4
	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	3	4
	4	3	3	4	4

Matriz GG) resiliencia social

HH) Vulnerabilidad social
Reclasificada a capa booleana
+ I) riesgo de inundación

Riesgo ambiental de inundación					
Vulnerabilidad	+	1	2	3	4
	0	1	2	3	4
	1	2	3	4	5

J) Integración para obtener el riesgo total de inundación

Fig. 24. Integración de variables para obtención del riesgo total de inundación

7. 4 Identificación de zonas de conflicto empleadas como vertederos clandestinos

El mapa de zonas de conflicto se elaboró a partir de la investigación documental acerca de vertederos clandestinos en el municipio, la colecta de datos en campo se realizó con un GPS (*Garmin eTrex® 10*) de manera aleatoria con base a esta información, y también se realizó la identificación y digitalización de los polígonos en *Google earth*, ver figura 25:



Fig. 25. Imágenes de algunos puntos usados como basureros, tomadas en campo. A) quema de basura en zona aledaña al río de los remedios; B) costales de basura sobre avenida central; C) Basurero en Chiconautla y D) Parque sobre avenida San Agustín. La imagen C) fue tomada de: <http://elmexiquensehoy.blogspot.mx>

8.0 Resultados y discusión

8.1 Descripción de la caracterización socio-ambiental, Sistema de Información Geográfica Medio Ambiental (SIGMA)

8.1.1 Subsistema biofísico

a) Elevación, pendiente y orientación

Ecatepec de Morelos, pertenece al Eje Neovolcánico y a la sub-provincia Lagos y volcanes del Anáhuac (INEGI, 2009). De acuerdo con el MDE, el municipio se encuentra entre los 2,225 - 2,885 m.s.n.m, las partes más altas están entre 2,516-2,885 m.s.n.m y se ubican al oeste en las partes altas de la Sierra de Guadalupe, en la parte media de esta y al noreste en Chiconautla la elevación va de 2,299 a 2,515 m.s.n.m, en formaciones antiguas del relieve, mientras que en la zona urbana la elevación está entre los 2,225 y 2,298 m.s.n.m, *ver mapa 2*.

La inclinación del terreno va de 1 a 51.27°, con una predominancia de zonas planas en toda la parte este de la división que proporciona el Gran Canal (máximo 15°), mientras que las zonas con inclinaciones de los 15 a los 51.27 ° se ubican al oeste y corresponden a la porción de la Sierra de Guadalupe que se ubica en el municipio, la pendiente se representa en el mapa por curvas de nivel, la pendiente escarpada muestran curvas de nivel más próximas entre sí, mientras que las zonas más planas muestran curvas de nivel más separadas, *ver mapa 3*.

b) Geología

El municipio yace sobre unidades litológicas de los sistemas Neógeno y Cuaternario y pertenecientes al Cenozoico. Posee rocas *ígneas extrusivas* en las formaciones del relieve de origen volcánico, distribuidas al oeste del municipio, en la Sierra de Guadalupe y al noreste en las partes altas del cerro Chiconautla, en 3, 145.21 ha (19.90 %) del territorio, son de los tipos: andesita, toba básica, volcanoclástica, brecha volcánica básica y basalto, *ver mapa 4*.

Las rocas *sedimentarias*, ocupan 994. 71 ha (6.30%) del municipio, son del tipo brecha sedimentaria, un conglomerado de material calcáreo, que ha sido sepultado en sedimentos finos y cementantes, y se ubican al oeste a las faldas de la Sierra de Guadalupe y al noreste a las faldas del cerro Chiconautla, *ver mapa 4*.

La mayor parte del municipio o la zona urbana, yace sobre unidades aluviales y lacustres, las rocas de origen aluvial ocupan 6,156.82 ha de la porción central (38.94%) y las lacustres: 5,511.11 ha de la parte este (34.86%), *ver mapa 4*. Los porcentajes los tipos de rocas presentes en el municipio, se muestran en la figura 26:

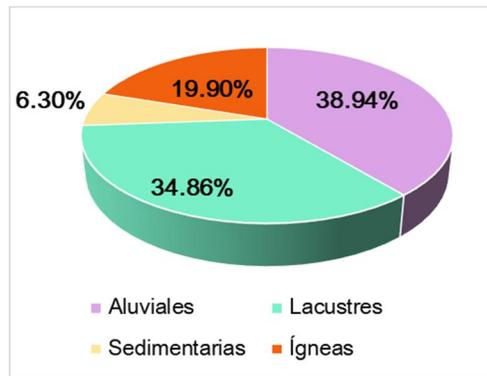


Fig. 26. Tipos de rocas presentes en el municipio.

c) Edafología

En Ecatepec predomina el tipo de suelo Solonchak en 9, 592.18 (60.68 %) en la zona urbana, este suelo se caracteriza por poseer altas cantidades de sales, la vegetación que puede habitar en ellos es la halófila, su uso agrícola se halla limitado a cultivos que toleren este tipo de pH o en zonas donde el suelo ha sido “lavado”, sin embargo su rendimiento es bajo para dichos fines, *ver mapa 5*.

Al oeste en la parte media de la Sierra de Guadalupe hay Feozem en 4, 170.12 (26.38%) es un suelo de textura media, rico en materia orgánica, de profundidad variable, cuando son muy delgados tienen rendimientos bajos y se erosionan con facilidad, y Leptosol en 1, 610.73 ha (10.19%) en las partes altas de la misma, y al noreste en Chiconautla, el nombre proviene del griego *lithos* que significa piedra, es por tanto un suelo pedregoso, de textura gruesa, su presencia es común en todas las sierras del territorio mexicano, barrancas, lomeríos e incluso algunas planicies, su profundidad es menor a los 10 cm por lo que la susceptibilidad a erosión es variable (dependiendo de otros factores ambientales), en bosques y selvas suele dársele un uso forestal, en pastizales y matorral se emplea para el pastoreo además tiene buena productividad agrícola en cultivos como el maíz y nopal, *ver mapa 5*.

En menor proporción al noreste del municipio en las partes altas del cerro Chiconautla se encuentran 433.81 ha (2.75%) de Rendzina, son suelos someros, pedregosos, de textura

gruesa, comunes en climas semi-áridos, tropicales y templados, su susceptibilidad a la erosión es moderada, soportan el uso forestal, mientras que su rendimiento en agricultura es variable (bueno para el cultivo de henequén y malo para el maíz, por ejemplo) (*Ver mapa 5*).

Los suelos descritos se agrupan en texturas de fina a media con 13, 762.30 ha (87.06%) y gruesa con 2, 044.54 (12.94%). La velocidad de permeabilidad aumenta proporcionalmente con la textura, de acuerdo con la clasificación de la FAO, es decir que entre más gruesa sea la textura más rápida la filtración. La proporción porcentual de las unidades de suelo, se muestra en figura 27, *ver mapa 5*:

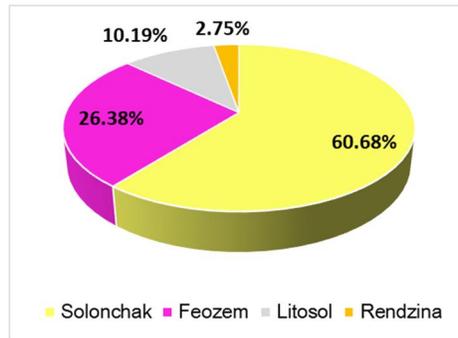


Fig. 27. Tipos de suelo presentes en el municipio

*Descripción de características de suelos con base a (INEGI, 2004; 2007)

d) Hidrología superficial y capacidad de microcuencas

El municipio pertenece a la red hidrológica Pánuco, cuenca Río Moctezuma y sub-cuencas Lagos de Texcoco y Zumpango. No cuenta con cuerpos de agua, sólo posee corrientes con drenaje artificial (INEGI, 2010).

Dentro de las corrientes de drenaje artificial presentes en Ecatepec, figuran el Gran Canal del desagüe, que atraviesa todo el municipio de norte a sur, éste a su vez se conecta al sureste con el canal Las Sales y al noroeste con el arroyo La Majada. Al sur colindando con el municipio Nezahualcóyotl, se ubica el río de los Remedios, que es un canal de aguas negras, *ver mapa 6*.

Otro rasgo hidrológico importante del territorio son las microcuencas, una microcuenca es una unidad geográfica en la que se desarrollan procesos socioeconómicos y ambientales, está delimitada por el relieve local, y en ella se concentra el agua de la precipitación pluvial. Para el municipio se identificaron seis microcuencas con base a la elevación del terreno, la de mayor capacidad se ubica al norte y posee 8,700.4 ha de superficie, mientras que la de menor capacidad se localiza al este y posee 200.71 ha de superficie, *ver mapa 6*.

e) Usos de suelo y vegetación

De acuerdo con los resultados de la clasificación supervisada de 2016, se distinguen doce usos de suelo y coberturas vegetales en el municipio. La mayor parte del territorio 10, 555.38 ha (66.77 %) está ocupada por la zona urbana, dentro de ésta se encuentra embebida la zona industrial que ocupa 469.80 ha (2.97 % del territorio), mientras que la vegetación urbana (camellones, parques, arbolado y áreas verdes en general), ocupa tan sólo 164.88 ha (1%) y está compuesta en su mayoría por plantas herbáceas, arbustivas y arbóreas introducidas (*ver mapa 7*). Hay 448.20 ha (2.82%) clasificadas como zonas sin vegetación aparente que podrían estar erosionadas, estas corresponden en su mayoría a la zona aledaña al Caracol (al este), debido a las características del suelo, el área cuenta con manchones de pastizal halófilo en 554.94 ha (3.51%), el cual está compuesto por especies de gramíneas que son capaces de tolerar suelos con alto contenido de sales y drenaje deficiente, así como 188.82 ha (1.19 %) de vegetación halófila hidrófila compuesta por herbáceas, gramíneas y plantas arbustivas que habitan en suelos húmedos-salinos (*ver mapa 7*).

Al Oeste del territorio se ubica la Sierra de Guadalupe, parque estatal desde 1976 e importante pulmón del área metropolitana, es una de las principales zonas de captación de agua por lo que en ella existen pozos de bombeo para la extracción de aguas subterráneas. Cuenta con 135 especies de vertebrados: 8 de anfibios (rana verde, rana gris, sapos), 20 de reptiles (camaleón, lagartija, víbora de cascabel), 80 de aves (lechuza, tecolotillo, gorrión, codorniz, colibríes) y 27 de mamíferos (gato montés, tlacuache, ardilla, conejo), por mencionar algunos (Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas del Estado de México, SEANPEM).

De acuerdo con la PAOT en 2009, la vegetación predominante en la Sierra es el matorral xerófilo, además posee un bosque artificial de eucalipto, casuarina, cedro blanco, encino, y pastizal inducido. Las especies vegetales más representativas de la zona son *Eysenhardtia polystachya* (palo dulce), *Acacia schaffneri* (huizache), *Prosopis laevigata* (mezquite), *Mimosa aculeaticarpa* var. *Biuncifera* (uña de gato), *Yucca filifera* (yuca), *Bursera cuneata* (copal), *Opuntia streptacantha* (tuna mansa), e *Ipomoea murucoides* (casahuate).

Por otra parte, con la clasificación supervisada se identificaron tres tipos de vegetación, en las partes altas bosque o uso forestal ocupando 454.05 hectáreas (2.87 %), en la parte media matorral espinoso en 1, 055.07 ha (6.67 %), estas plantas generalmente se encuentran en zonas secas, suelos delgados, laderas de cerros, sustratos volcánicos y aluviales, lo habitan herbáceas, leguminosas, arbustos, gramíneas y predominantemente plantas de tallos crasos

como nopales y otras cactáceas, y en las faldas predominó la zona urbana y el pastizal inducido, que ocupa 429.48 ha (2.72%), el cual está compuesto por gramíneas favorecidas por el desmonte de vegetación original, incendios y en general causas antrópicas (*ver mapa 7*). En menor proporción hay zonas agrícolas, al norte del municipio hay agricultura de riego anual y semipermanente en 623.88 ha (3.95%), estos agro-ecosistemas se basan en la utilización de agua implementada por sistemas de riego, no utilizan agua de precipitación y su periodicidad depende del tipo de cultivo, entre los principales encontramos: maíz forrajero, avena forrajera, calabacita, lechuga y alfalfa verde. La agricultura de temporal se ubica al Noreste y está distribuida en 715.86 ha (4.53%), en estos sistemas el riego se basa en la precipitación, por ello aunque los cultivos son los mismos que en agricultura de riego, su rendimiento es menor (INEGI, 2013; IGECEM, 2015) (*ver mapa 7*). El 1% territorial está ocupado por hidrología (158.85 ha), seguramente es más pero esto se explica por errores en la clasificación, ya que en esta sólo se ve representado el canal Las Sales, que forma parte del drenaje de la Ciudad de México y corre del Este al Sur municipal entre los límites del municipio Atenco y Nezahualcóyotl (respectivamente) y pequeños encharcamientos en la zona aledaña al Caracol, sin embargo aunque el método clasificador no los identificara, en el municipio también figuran el Gran Canal, el río de Los Remedios y La Majada. La relación percentual de usos de suelo y vegetación municipal se muestra en la figura 28, *ver mapa 7*:

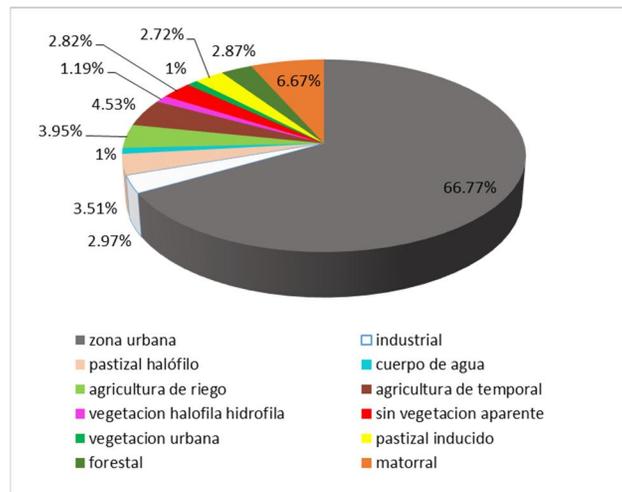
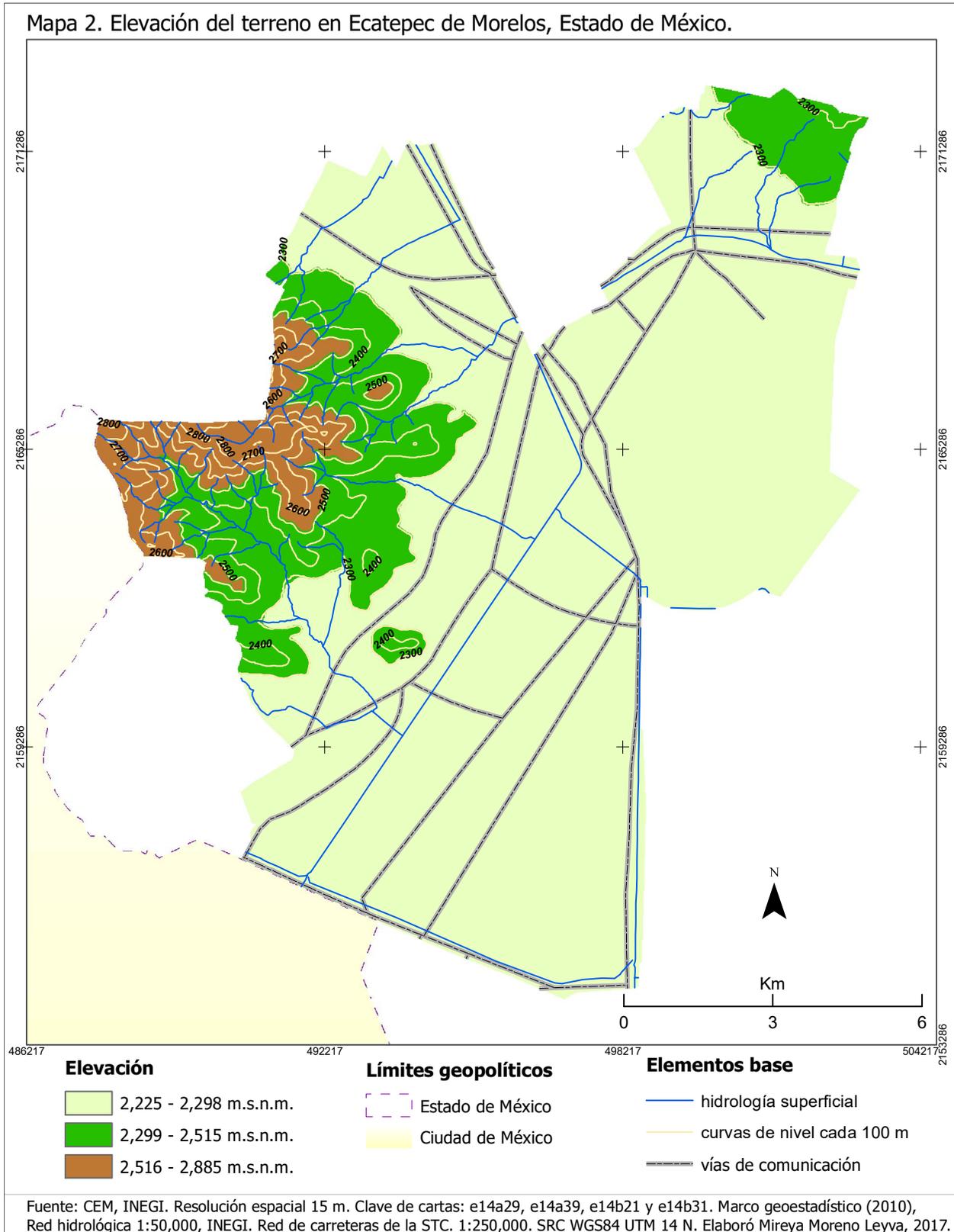


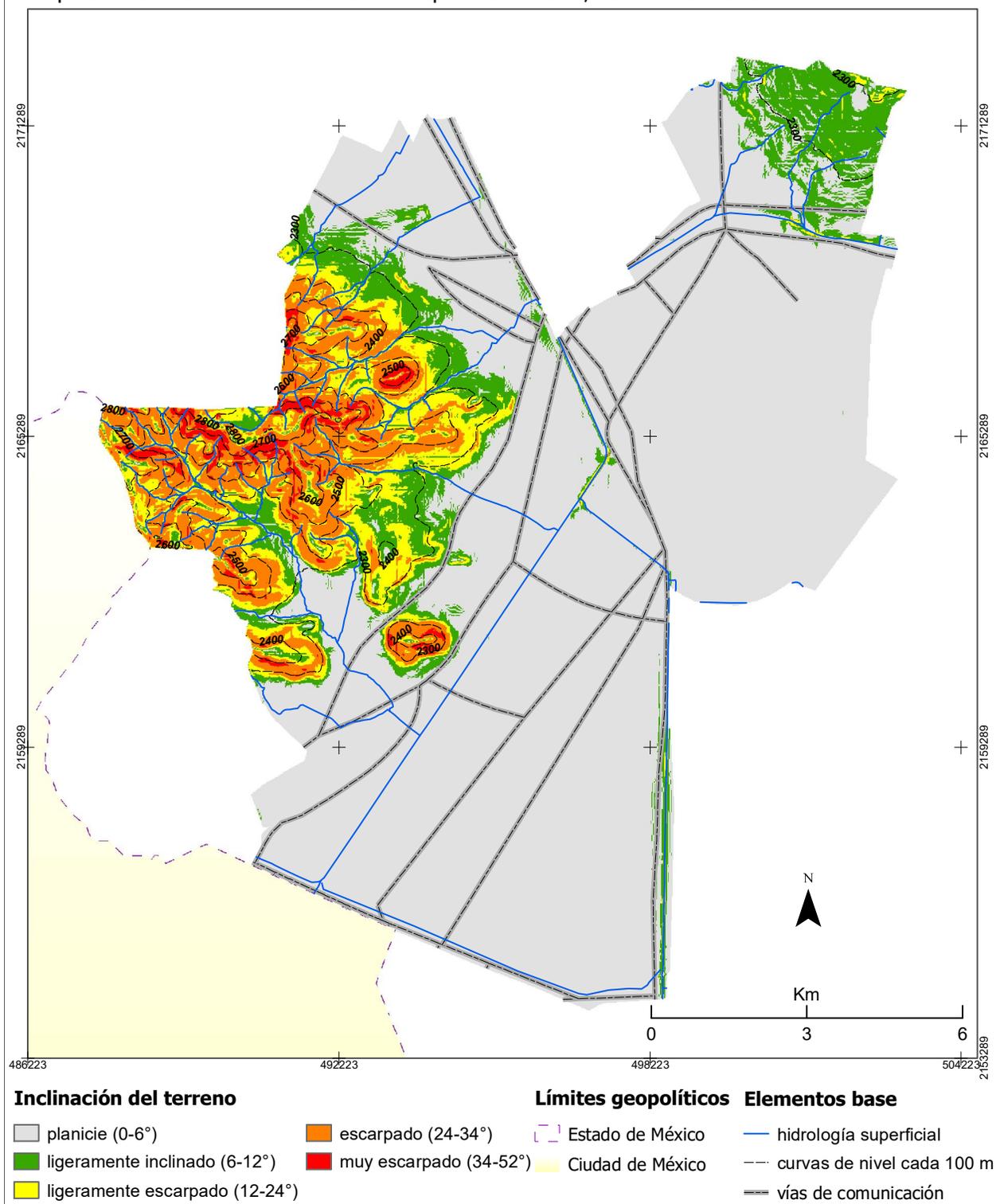
Fig. 28. Tipos de usos de suelo y vegetación municipales para 2016

Anexo cartográfico 1. Subsistema biofísico

Mapa 2. Elevación del terreno en Ecatepec de Morelos, Estado de México.

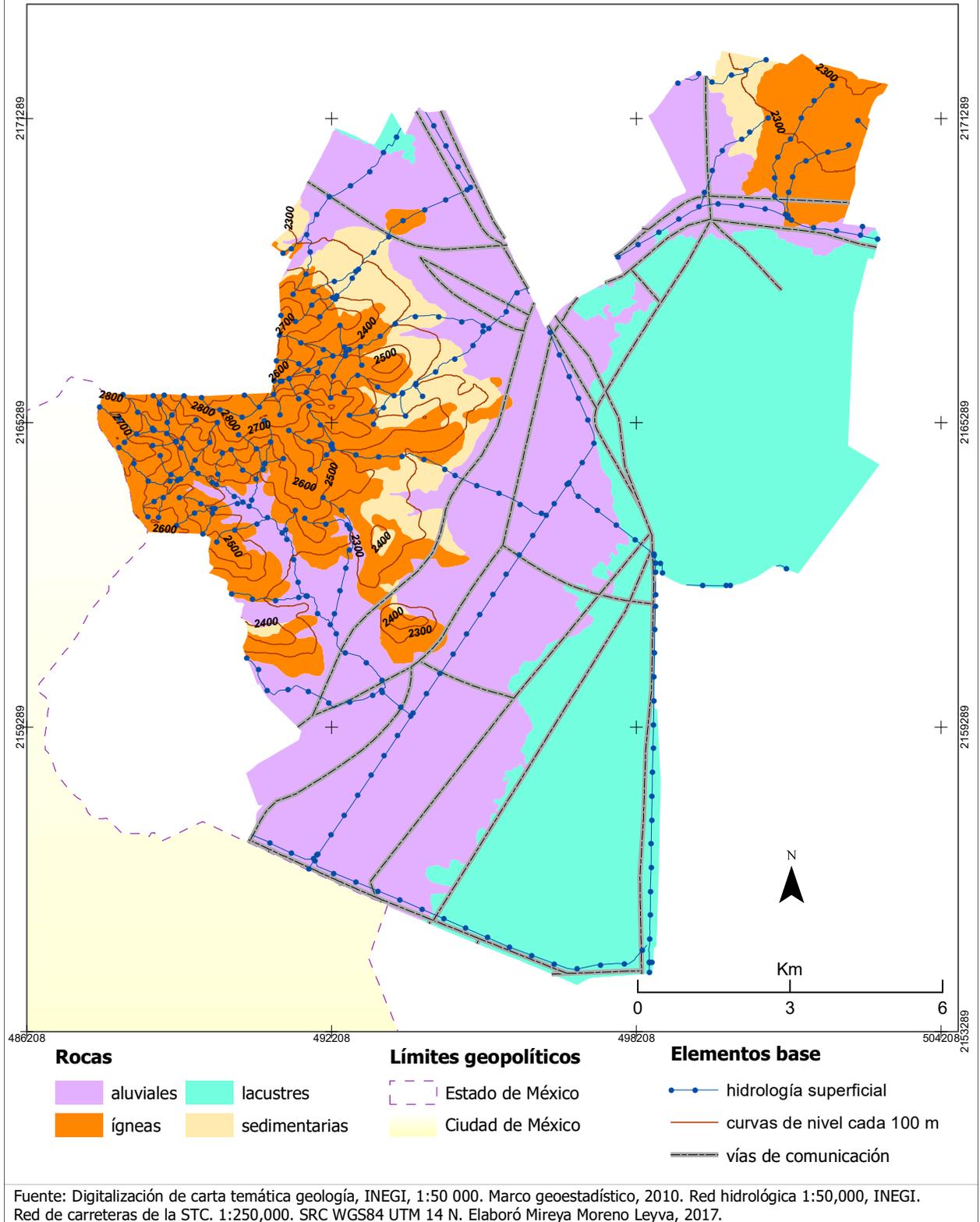


Mapa 3. Inclínación del terreno en Ecatepec de Morelos, Estado de México.

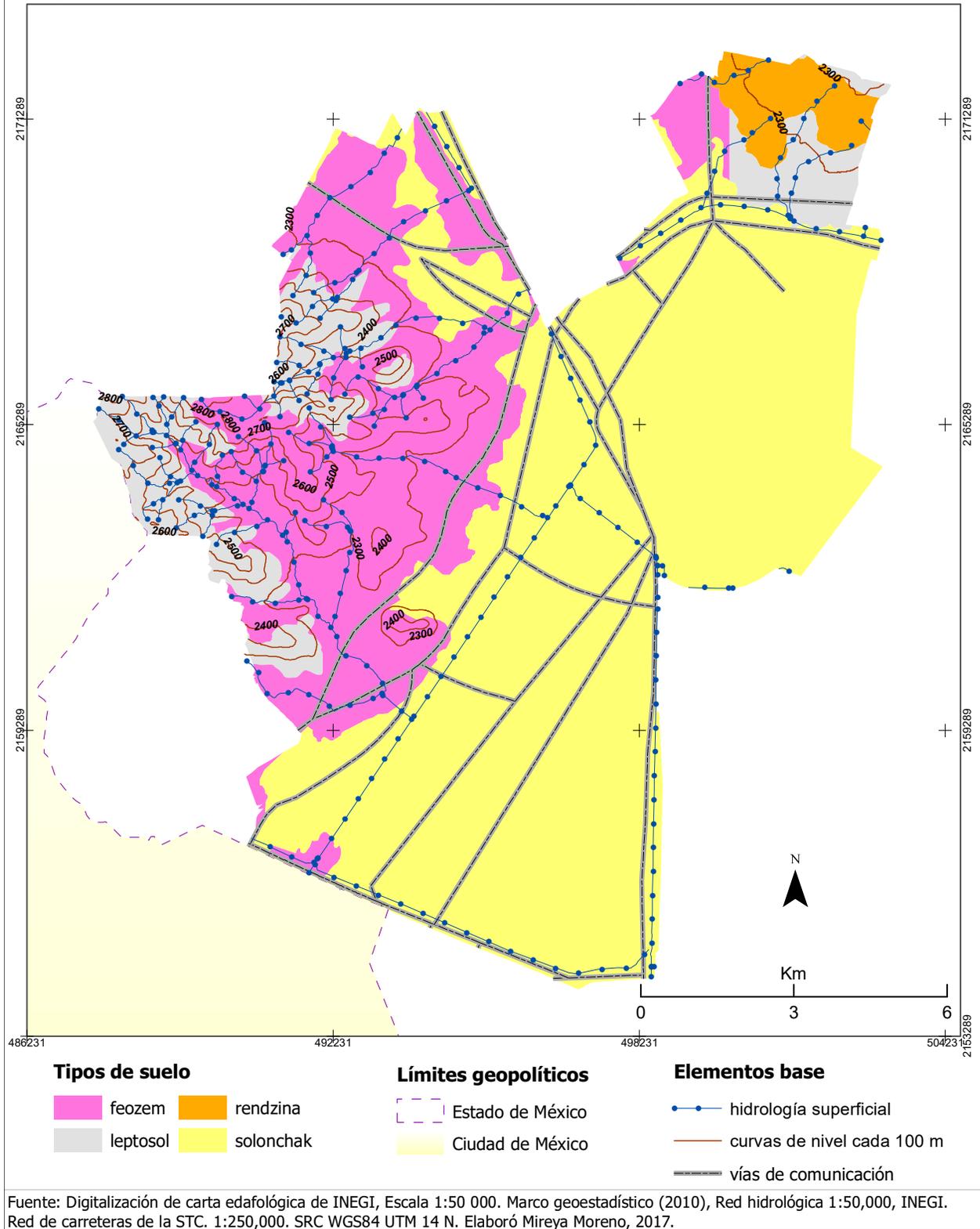


Fuente: CEM, INEGI. Resolución espacial 15 m. Clasificación de la pendiente (FAO, 2009). Marco geoespacial, 2010, Red hidrológica 1:50,000, INEGI. Red de carreteras de la STC. 1:250,000. SRC WGS84 UTM 14 N. Elaboró Mireya Moreno Leyva, 2017.

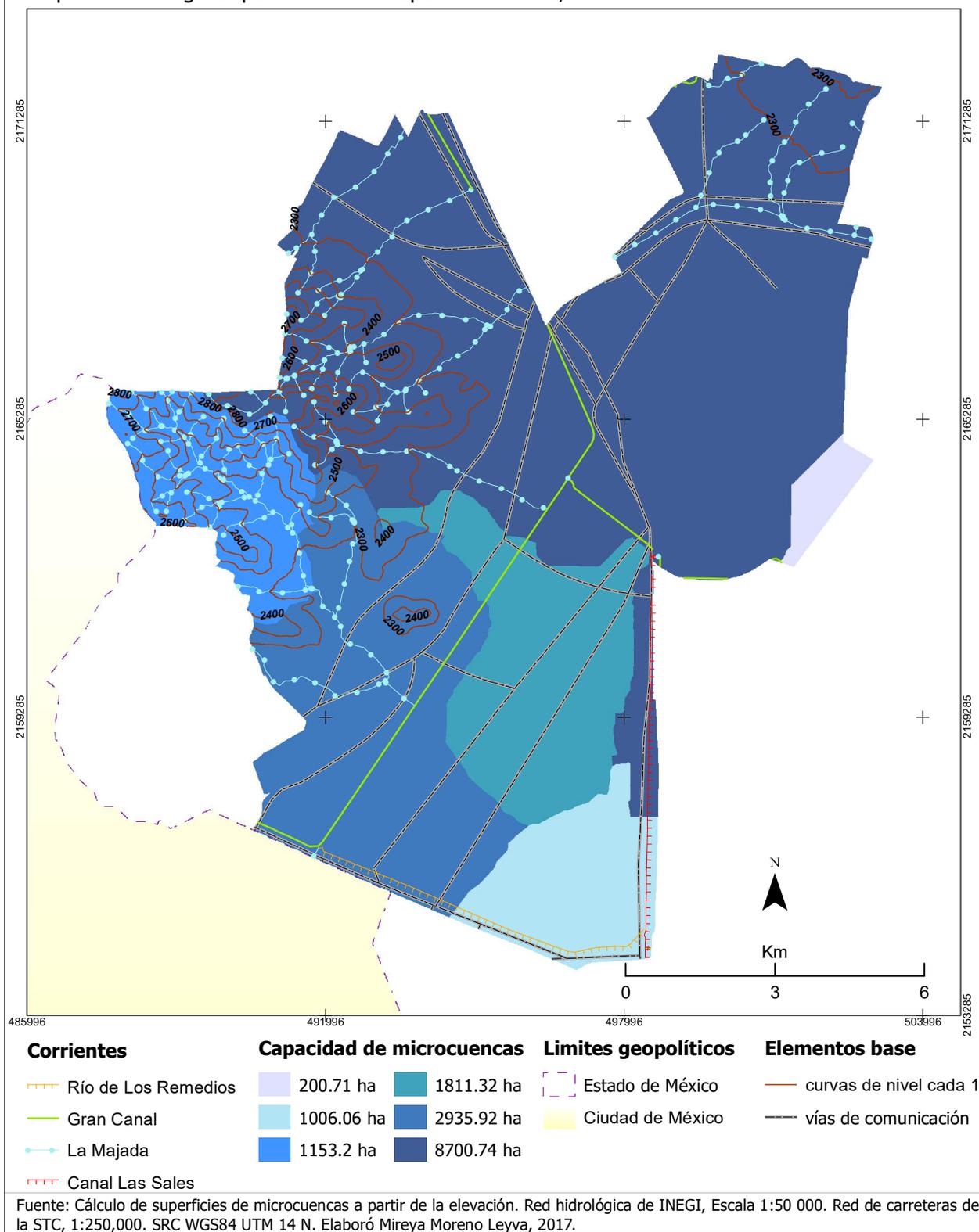
Mapa 4. Tipos de rocas presentes en Ecatepec de Morelos, Estado de México.



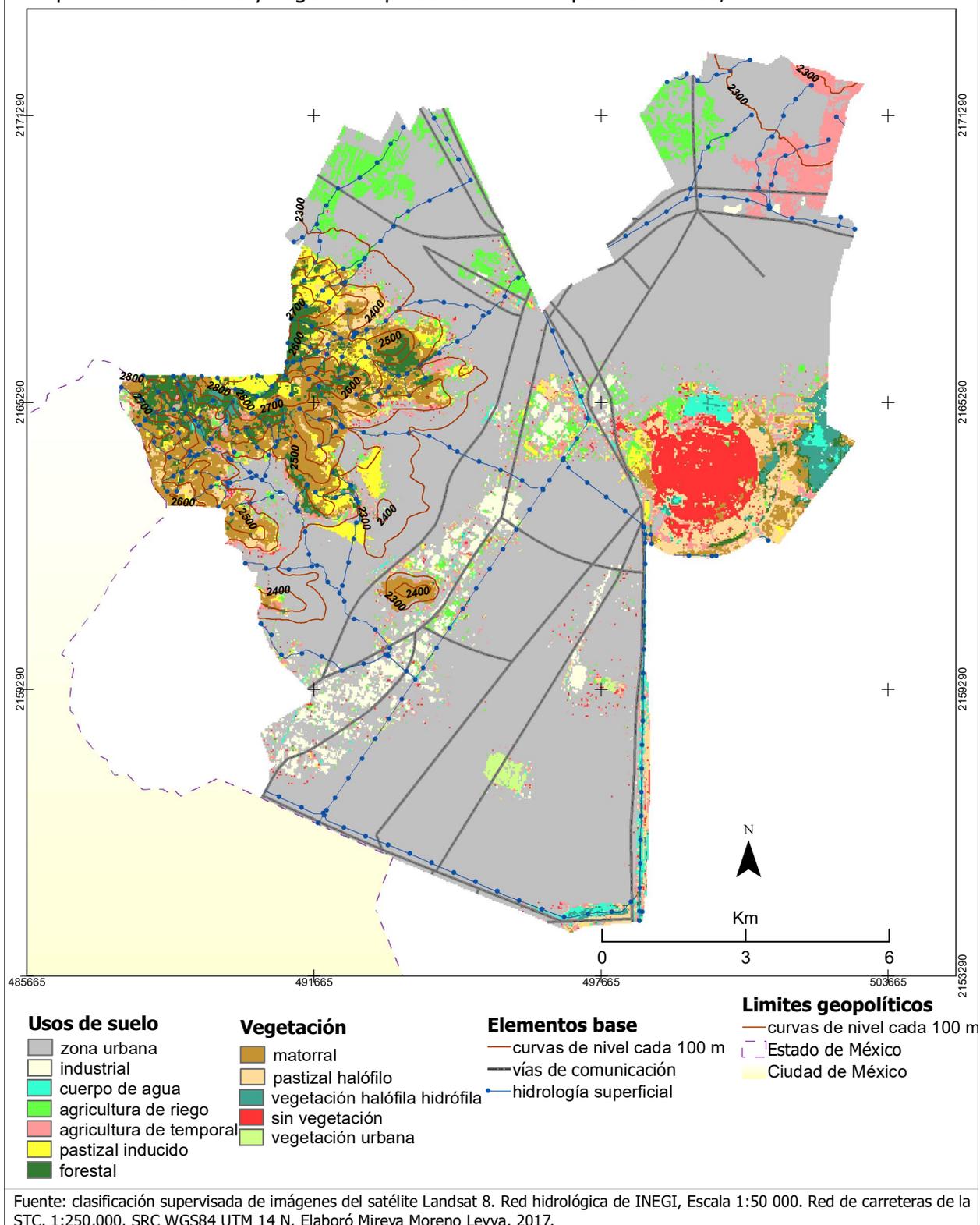
Mapa 5. Unidades de suelo presentes en Ecatepec de Morelos, Estado de México.



Mapa 6. Hidrología superficial de Ecatepec de Morelos, Estado de México.



Mapa 7. Usos de suelo y vegetación presentes en Ecatepec de Morelos, 2016.



8.1.2 Subsistema climático

De acuerdo con el mapa de climas del Estado de México (Casa y Gustavo, 1997), basado en la clasificación de Koppen modificada por García, Ecatepec tiene dos climas, seco estepario semiárido-templado (el menos seco dentro de los secos), en la zona urbana, y templado-subhúmedo (el de menor lluvia dentro de los templados), al noroeste en la Sierra de Guadalupe.

a) Temperatura

Las interpolaciones climáticas muestran que las temperaturas mínimas anuales en el municipio van de los 6.19 a los 12.6 °C, siendo enero el mes más frío con temperaturas que oscilan entre 0.9-8.2 °C, seguido por diciembre cuyos intervalos van de 1.7- 10.5 °C y febrero (2.09-10.71°C). Los valores medios anuales de temperatura son de 15.22-21.02°C, mientras que las máximas promedio anuales van de 23.8- 30.3°C, siendo los meses más calurosos abril y mayo, con temperaturas de 26.5 hasta 32.3 °C aproximadamente. Las temperaturas promedio en la zona urbana están entre 16-17°C, al este municipal las temperaturas van de 17°C a 21.02°C, mientras que las temperaturas más bajas se localizan al noroeste y al noreste en formaciones del relieve (15.22°C- 16°C), *ver mapa 8*.

b) Precipitación

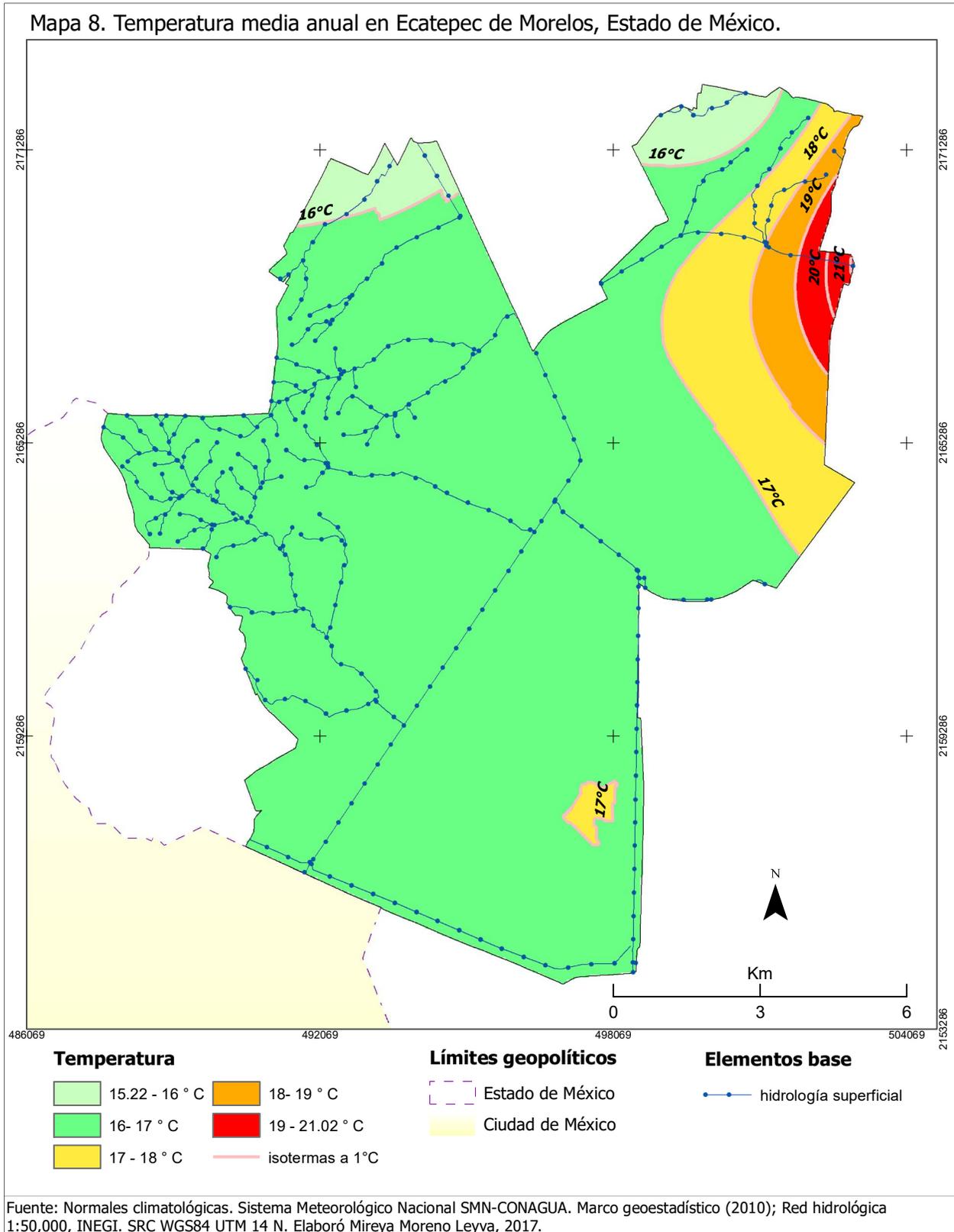
La precipitación promedio está entre los 553.13 - 685.04 mm anuales, siendo los meses más lluviosos: junio (99.90-126.64 mm), julio (107.00-144.02 mm) y agosto (94.60-164.64 mm), esto incrementa la probabilidad de inundación en dichas épocas del año. Los meses con precipitaciones más bajas son: diciembre (1.88-6.83 mm), febrero (4.23- 8.23 mm) y enero (5.69-10.11 mm). La precipitación en la zona urbana va de los 553 a los 620 mm anuales, mientras que en las zonas con relieve es más fuerte y va de los 620 a los 671.9 mm anuales, en las partes más altas de la Sierra de Guadalupe al oeste y al noreste en el cerro de Chiconautla, *ver mapa 9*.

c) Evaporación

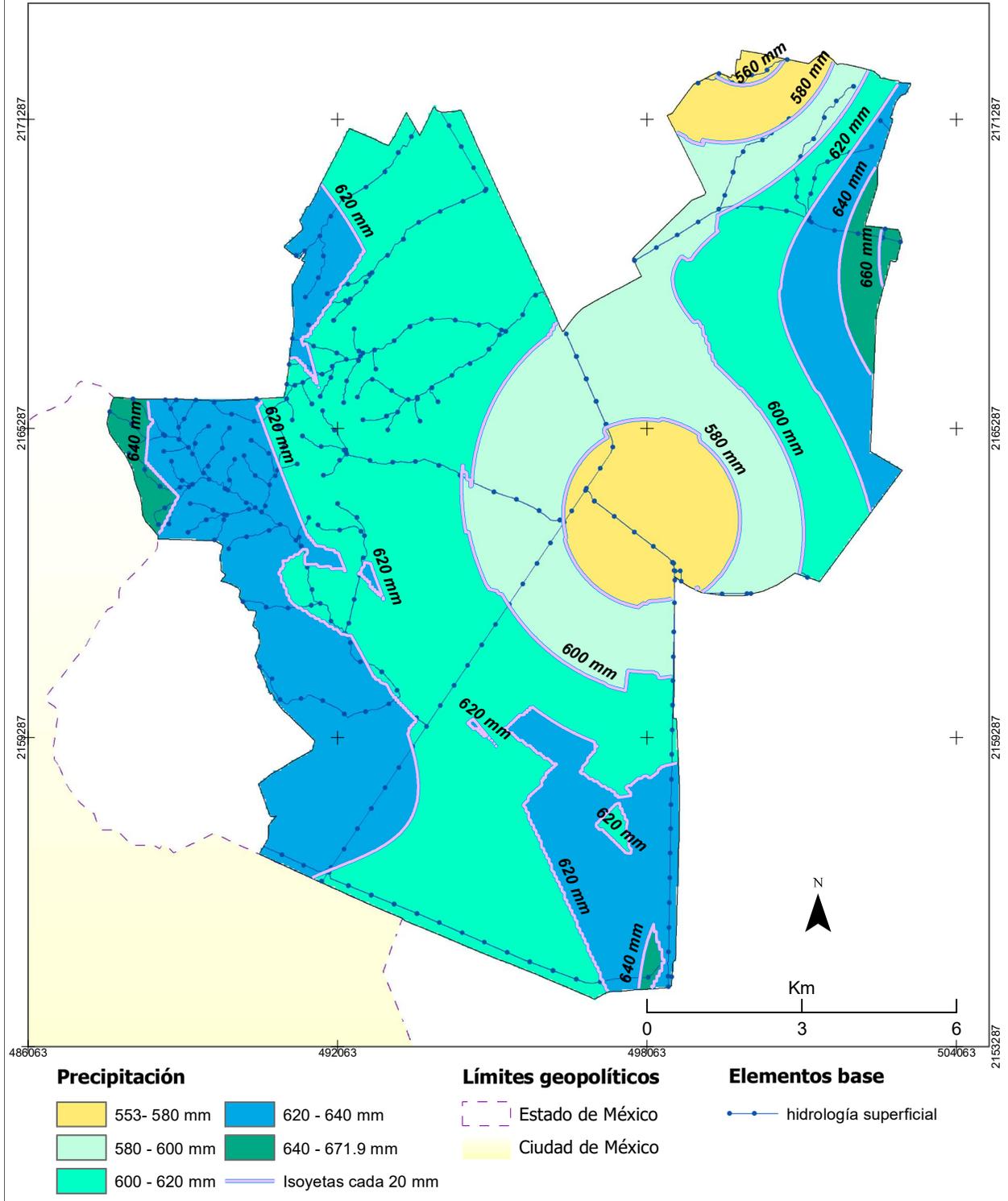
Los valores medios de evaporación van de 1,522.46 – 1,900 mm anuales, la evaporación alta puede contribuir a disminuir encharcamientos. La evaporación más baja (1,522.46-1,700 mm) está en la zona boscosa de la Sierra, mientras que la evaporación alta (1,700-1,900 mm) está en la zona urbana, por ser una planicie sin vegetación, *ver mapa 10*.

Anexo cartográfico 2. Subsistema climático

Mapa 8. Temperatura media anual en Ecatepec de Morelos, Estado de México.

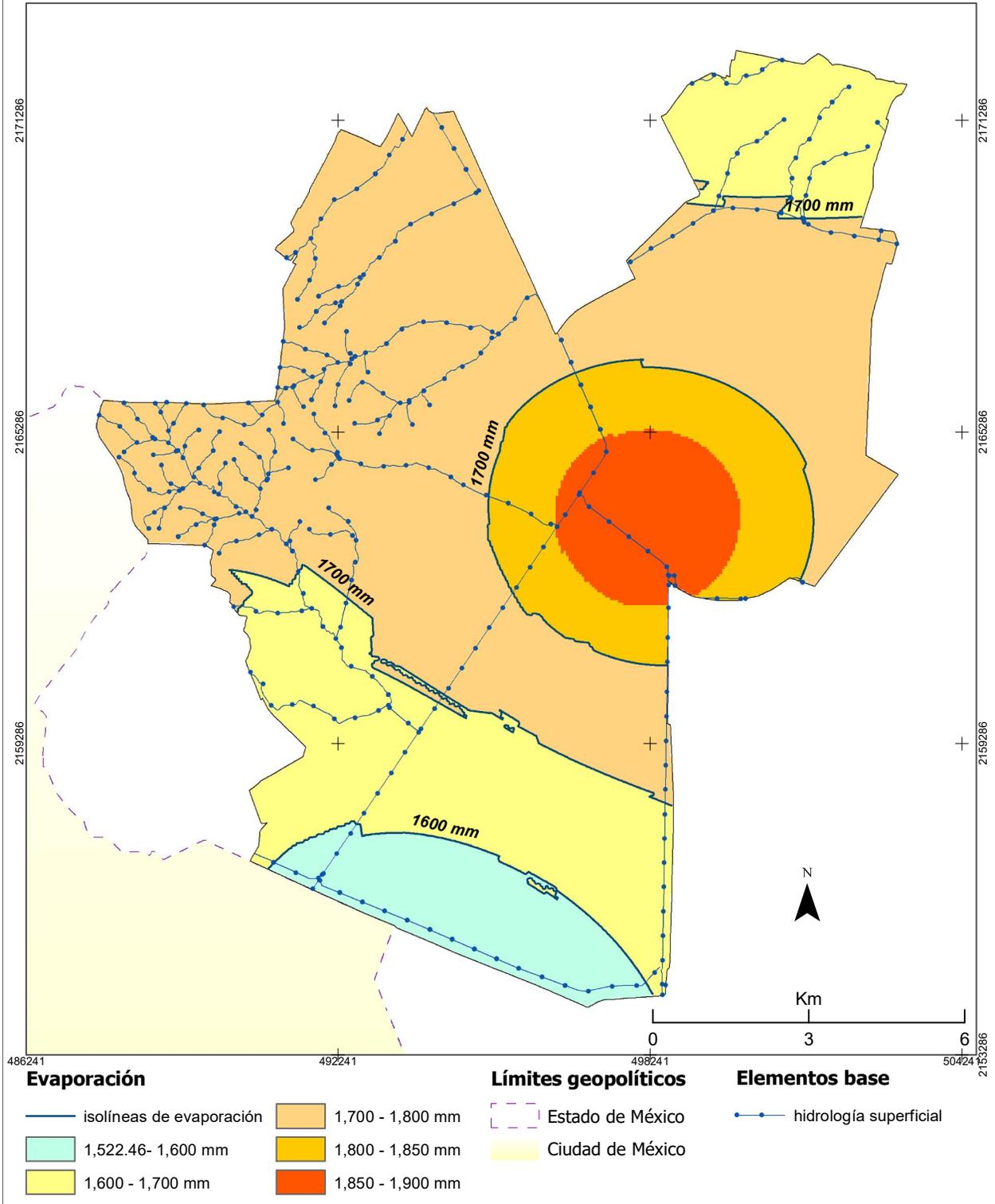


Mapa 9. Precipitación media anual en Ecatepec de Morelos, Estado de México.



Fuente: Normales climatológicas. Sistema Meteorológico Nacional SMN-CONAGUA. Marco geoestadístico (2010); Red hidrológica 1:50,000, INEGI. SRC WGS84 UTM 14 N. Elaboró Mireya Moreno Leyva, 2017.

Mapa 10. Evaporación media anual en Ecatepec de Morelos, Estado de México.



Fuente: Normales climatológicas. Sistema Meteorológico Nacional SMN-CONAGUA. Marco geoestadístico (2010); Red hidrológica 1:50,000, INEGI. SRC WGS84 UTM 14 N. Elaboró Mireya Moreno Leyva, 2017.

8.1.3 Subsistema socioeconómico

a) Población total

La población total del municipio para 2010 era de 1, 656, 107 habitantes, y ascendió a 1, 677, 678 habitantes para 2015, siendo 814, 477 (48.54%) hombres y 863, 201 (51.45 %) mujeres, teniendo una densidad poblacional de 10, 473. 22 habitantes por km², cabe destacar que el 99.93 % de esos habitantes radican en zonas urbanas, mientras que sólo el 0.07 % vive en zonas rurales (INEGI, 2015). El mayor número de habitantes se concentra en la cabecera municipal, que se ubica al Norte, a la altura de la colonia “El progreso” y zonas aledañas, así como al Este en la localidad “Colonia El Salado”. La menor cantidad de habitantes se ubica al Oeste en la Sierra de Guadalupe, concretamente en el Ejido San Pedro Xalostoc (*ver mapa 11*). La información censal de INEGI para el 2010, muestra que existen 9 localidades en el municipio, las cuales fueron empleadas para realizar las interpolaciones de indicadores sociales, es importante aclarar que la generalización es alta debido a que la escala de ésta base de datos es de 1:1, 000,000 (nivel República Mexicana). De manera más específica el bando municipal del ayuntamiento de Ecatepec de Morelos 2013-2015 tiene registro de 359 colonias en el territorio, sin embargo no hay datos vectoriales disponibles a esta escala.

b) Población de 0 a 14 años

De acuerdo con los resultados de la interpolación de proximidad se reportan 436, 452 habitantes en edad de 0 a 14 años (26.35%) para el censo de 2010, esta cifra disminuyó a 393, 055 habitantes, para 2015 (Ayuntamiento de Ecatepec, 2016). Las áreas socialmente más vulnerables por edad (0 a 14 años) son: la cabecera municipal, que está localizada al Norte y abarca colonias como: los Héroes Ecatepec o el Progreso, y la localidad “Colonia El Salado”, ubicada al Este en colonias como: el fraccionamiento Las Américas, rinconada de Aragón, Polígonos, La Florida y San Agustín (*ver mapa 12*).

c) Población con algún tipo de discapacidad o limitación física y mayor de 65 años

Los habitantes con discapacidad física ascienden a 71, 519 habitantes (4.31%) (*Ver mapa 13*). De acuerdo en el censo de 2010, las principales discapacidades en la población son: limitación en la actividad, alteración en la función motriz (problemas para andar o moverse) y ceguera. En la cuadro 8, se muestra el número de habitantes en ésta condición de manera más específica:

Cuadro 8. Número total y género de habitantes con alguna discapacidad a nivel municipal en 2010.

Ecatepec de Morelos
Población Total Según condición y tipo de limitación en la actividad 2010

Condición de Derechohabencia	Total	Hombre	Mujer
Total	1,656,107	806,443	849,664
Con Limitación en la Actividad	63,221	31,451	31,770
Caminar o Moverse	32,142	14,716	17,426
Ver	19,966	9,696	10,270
Escuchar	6,346	3,449	2,897
Hablar o Comunicarse	4,797	2,751	2,046
Atender el Cuidado Personal	2,769	1,291	1,478
Poner Atención o Aprender	2,937	1,636	1,301
Mental	6,182	3,481	2,701

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2010.

Tomada de: Plan de desarrollo municipal de Ecatepec de Morelos, Estado de México (2016-2018).

Ayuntamiento de Ecatepec, 2016.

La población senil del municipio está conformada por 93, 572 habitantes (5.65%) aproximadamente (*ver mapa 14*) (INEGI, 2010), la cual ascendió a 375, 301 (22.37 %) para el año 2015 (Ayuntamiento de Ecatepec, 2016). Los sectores de la población vulnerables por tener algún tipo de limitación física o estar en edad senil, habitan principalmente al Norte en la cabecera municipal, al Noroeste en la Mesa de los Leones y ligeramente al centro en la localidad Tierra Blanca, que abarca las colonias: Viveros de Tulpetlac y Colinas de Ecatepec, por mencionar algunas zonas.

d) Población económicamente activa PEA

La población económicamente activa del municipio para el 2010 fue de 700, 868 habitantes (42.32%), de acuerdo con la encuesta intercensal para el 2015, esta cifra aumentó a 1, 367, 194 personas; de las cuales el 51.31% es económicamente activa (PEA); la población económicamente inactiva (PEI) representa 48.52%, y 0.17 % no especifica su condición económica (Ayuntamiento de Ecatepec, 2016). La PEA reside principalmente al centro del municipio en la localidad Tierra Blanca, al Noroeste en La Mesa de los Leones y al Norte en la cabecera municipal (*ver mapa 15*).

e) Grado de marginación

Este índice muestra la desigualdad social producida por las carencias de la población (bajo acceso a servicios educativos, residencia en viviendas precarias y carencia de bienes o

propiedades), fue elaborado por CONAPO y está basado en la información censal de INEGI del 2010. La población con nivel muy bajo de marginación se localiza al Norte en colonias como El progreso y Los Héroes Ecatepec, en la cabecera municipal, el grado más alto de marginación se ubica en la parte alta de la Sierra de Guadalupe al Este municipal, concretamente en el ejido San Pedro Xalostoc, mientras que el resto del municipio está en la categoría de marginación alta (*ver mapa 16*).

f) Grado de rezago social

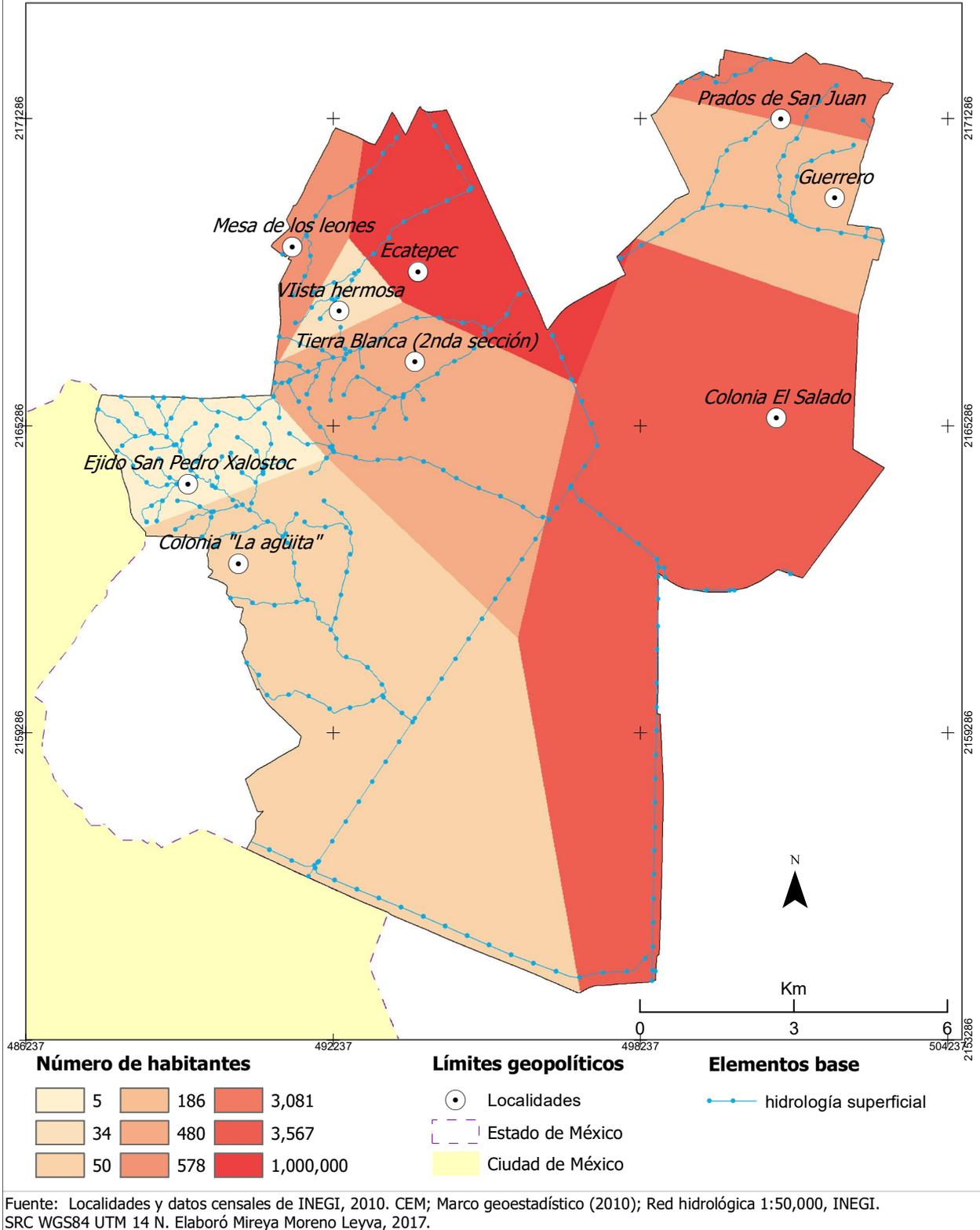
Este indicador deriva del índice de rezago social IRS, una medida proporcionada por el CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social), el cual fue calculado partir de variables como el acceso a la educación (rezago educativo), acceso a servicios de salud, calidad en los espacios y servicios básicos de la vivienda, así como el número de miembros económicamente activos en el hogar. De acuerdo con la cartografía, el rezago social más bajo se ubica al Norte, en la cabecera municipal (colonias el Progreso y los Héroes Ecatepec), el rezago medio al Noroeste en La mesa de los Leones y al Suroeste la localidad Colonia el agüita, que comprende las colonias Santa Clara y Xalostoc, el resto del municipio se encuentra en la categoría de rezago bajo (localidades Vista Hermosa, Tierra Blanca, Colonia El Salado, Guerrero y Prados San Juan (*ver mapa 17*)).

g) Carencia al acceso de servicio de salud

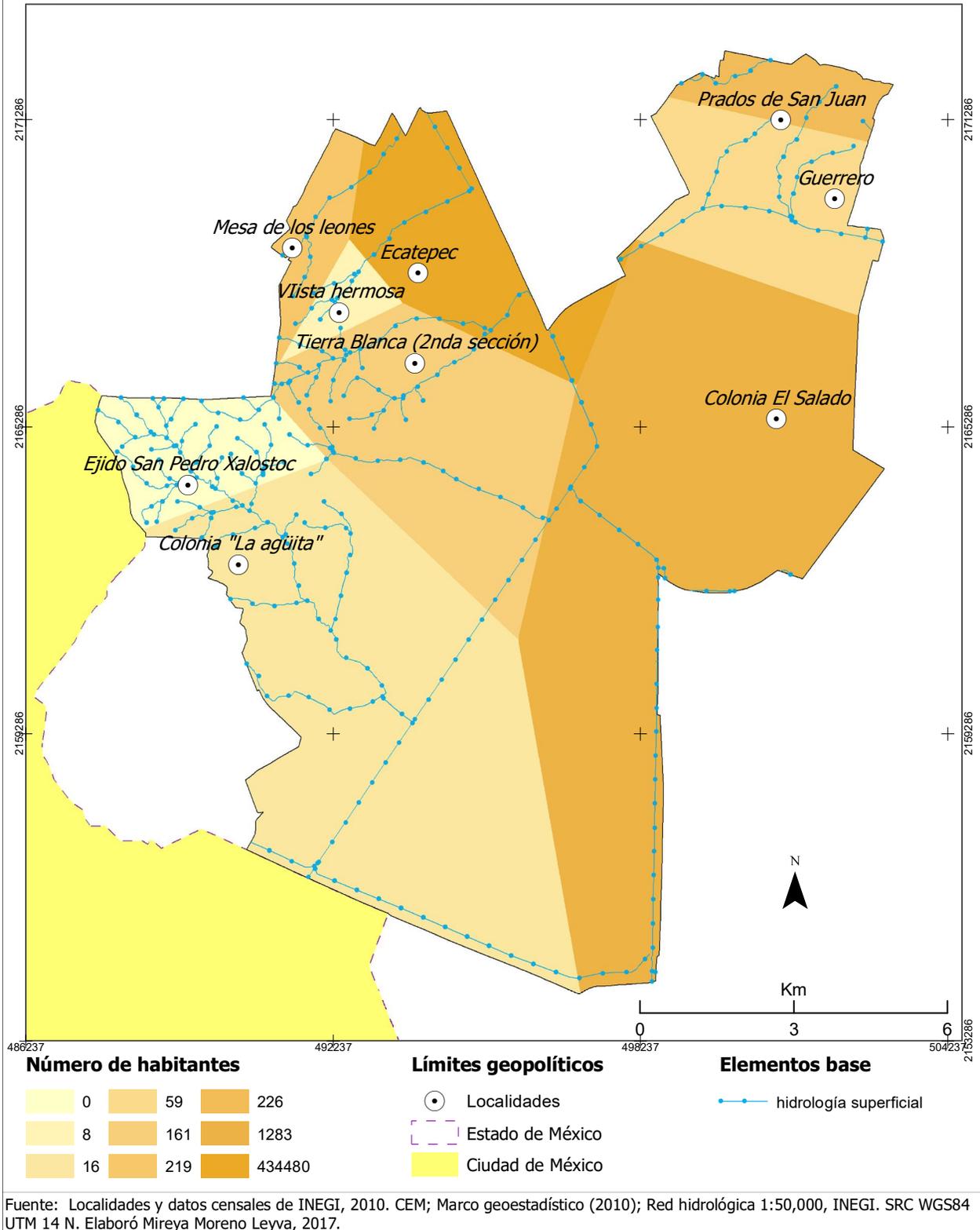
El acceso a los servicios de salud forma parte de los derechos constitucionales de todos los mexicanos (Artículo 4°), constituye a su vez un elemento fundamental de la calidad de vida de todo individuo, ya que es la base del bienestar físico y mental del mismo. Cuando no se tiene acceso a los servicios de salud, el costo de cualquier enfermedad o accidente, puede vulnerar la integridad física individual y/o el patrimonio familiar (CONABIO, 2014). En términos de medición de pobreza, de acuerdo con el censo de INEGI en 2010, el 40 % de la población (aproximadamente 713, 991 habitantes) de Ecatepec no estaba afiliada a instituciones públicas o privadas de salud, ésta cifra disminuyó para 2015 a 26.51% (Ayuntamiento de Ecatepec, 2016). Las localidades socialmente más vulnerables ante una inundación, por esta carencia se ubican al Noreste Prados San Juan y al Este en Colonia el Salado (*ver mapa 18*)).

Anexo cartográfico 3. Subsistema socioeconómico

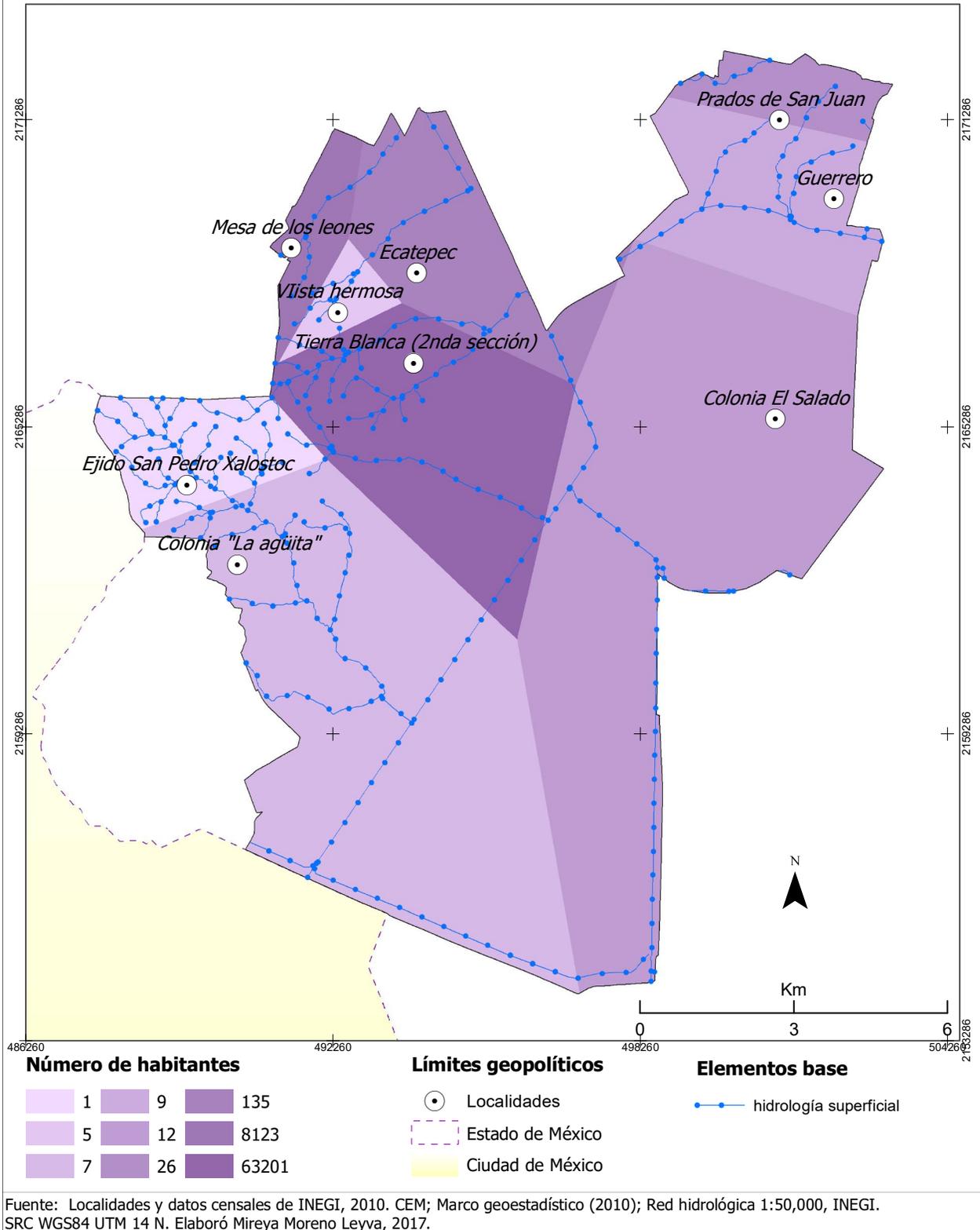
Mapa 11. Población por localidad en Ecatepec de Morelos, Estado de México.



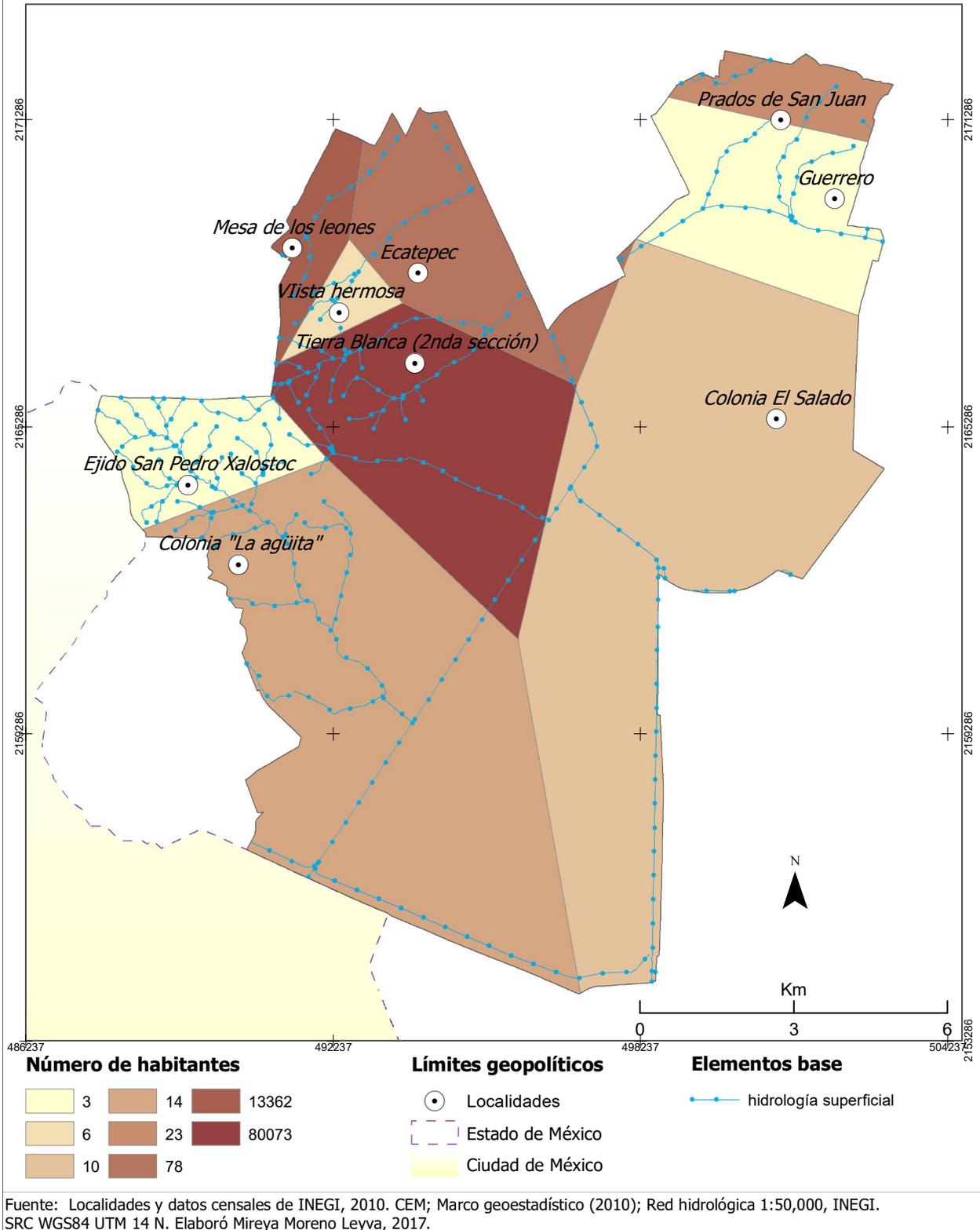
Mapa 12. Población con 0 a 14 años de edad, por localidad en Ecatepec de Morelos.



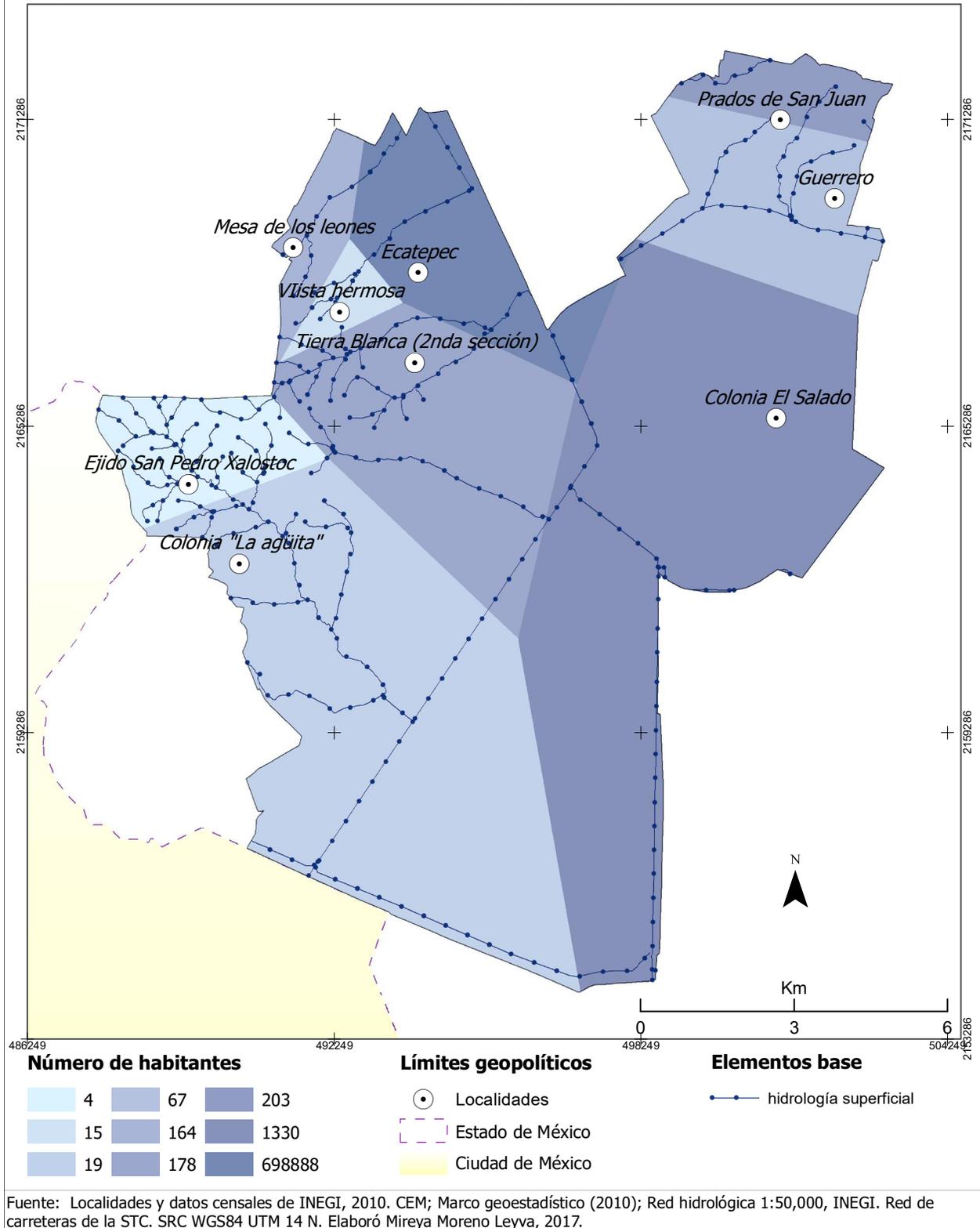
Mapa 13. Población con algún tipo de discapacidad por localidad, en Ecatepec de Morelos.



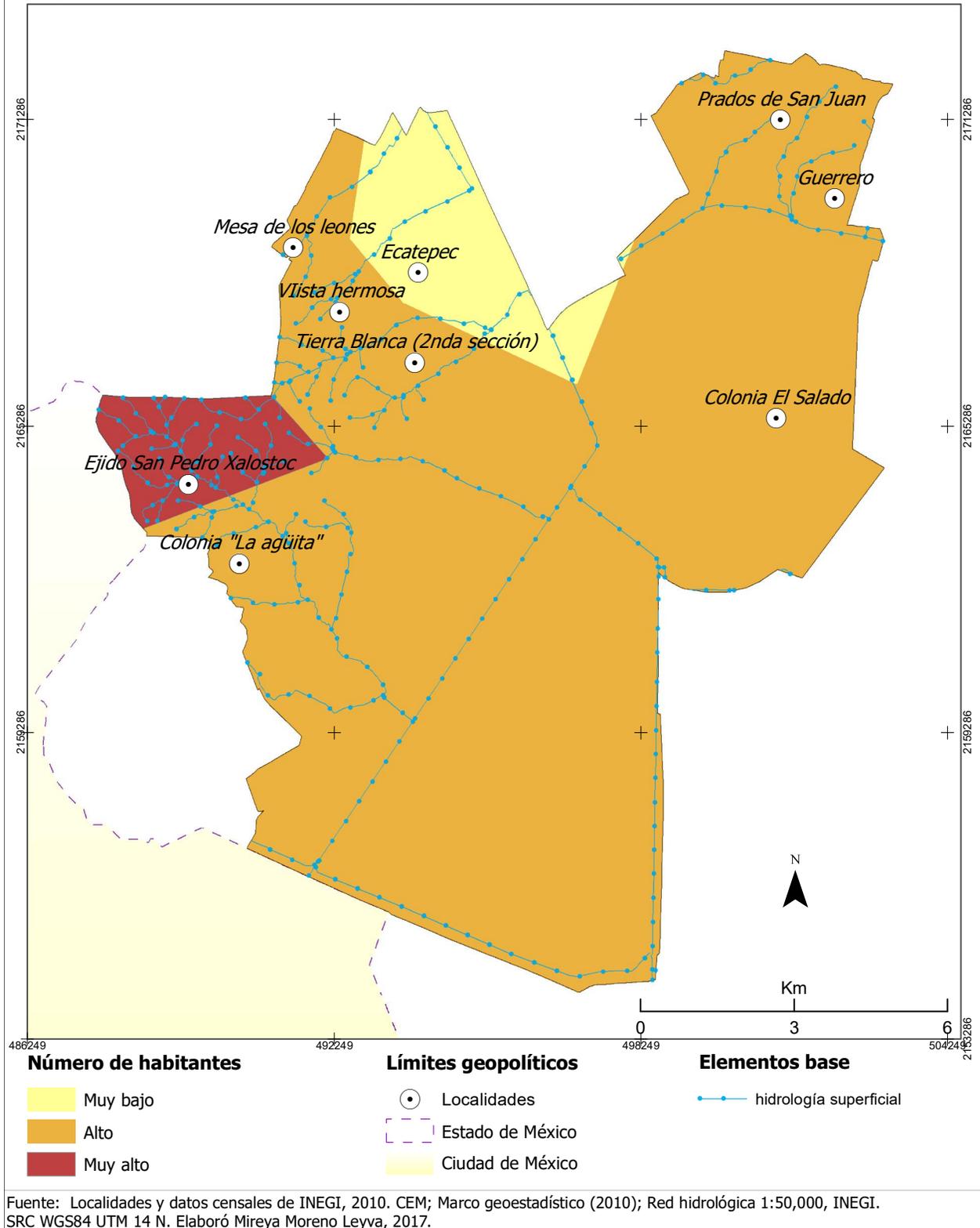
Mapa 14. Población mayor de 65 años de edad, en Ecatepec de Morelos.



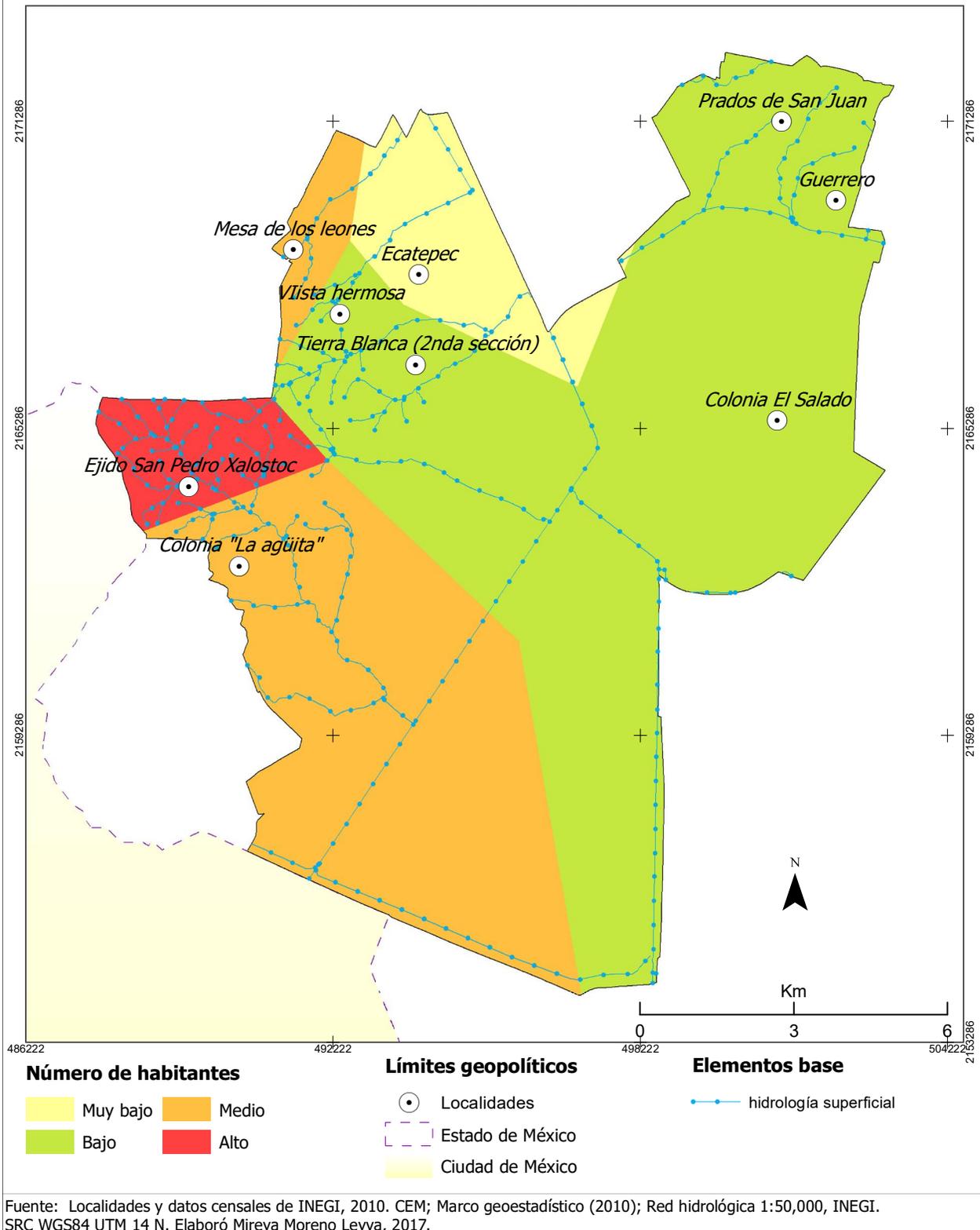
Mapa 15. Población económicamente activa (PEA), en Ecatepec de Morelos.



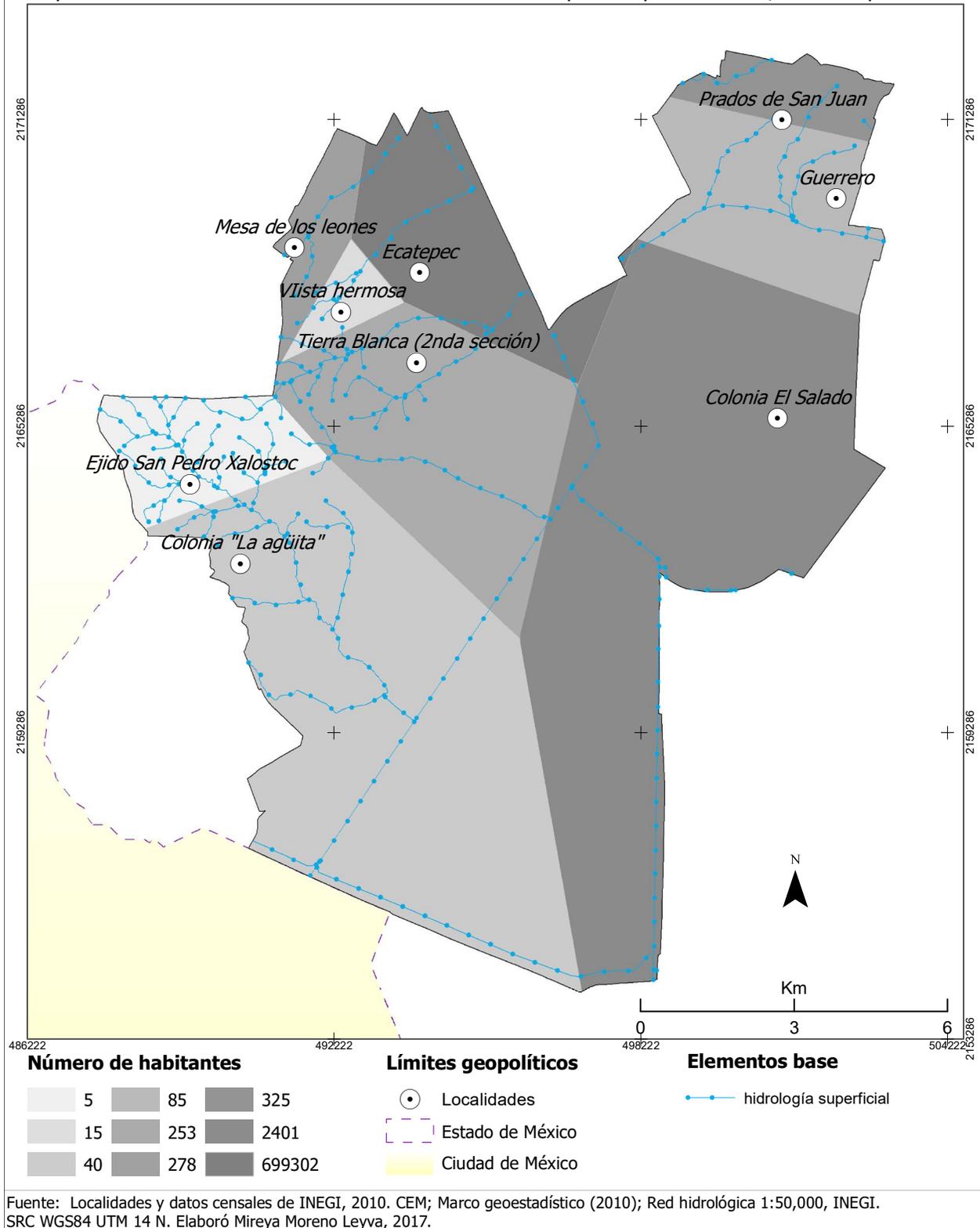
Mapa 16. Grado de marginación social por localidad, en Ecatepec de Morelos.



Mapa 17. Grado de rezago social por localidad, en Ecatepec de Morelos.



Mapa 18. Población no afiliada a los servicios de salud pública por localidad, en Ecatepec.



8.1.4 Discusión: relación de las características socioambientales municipales con el riesgo de inundación

Ecatepec posee características ambientales que lo hacen susceptible a las inundaciones: se encuentra entre los 2,225 -2,885 msnm, la inclinación del terreno alcanza los 51.27° en la Sierra de Guadalupe, mientras que el resto del municipio en dónde se ubica la mayor parte de la zona urbana tiene pendientes suaves o planicies de máximo 15°, en estas planicies se acumula el agua de la precipitación, por lo que son las más propensas a inundarse.

Lo anterior se debe a que de manera natural el agua de la precipitación fluye por las zonas montañosas hasta las zonas planas del territorio, en dónde se acumula formando lagos, evaporándose y filtrándose al subsuelo a través de la vegetación presente, de ésta forma ocurría en la Cuenca de México, inmersa entre las cadenas montañosas del eje neovolcánico, y cuyo punto final de escorrentía era el Lago de Texcoco, sobre el que actualmente yace Ecatepec, sin embargo, debido a que después de la colonia se secaron los lagos y se urbanizó, actualmente el desagüe de ésta zona depende por completo del drenaje profundo, el cual ha sido insuficiente para evitar las inundaciones, ya que ha colapsado por la basura, y por los hundimientos del suelo. Los hundimientos ocurren por el pasado lacustre del municipio, ya que los sedimentos son blandos, predominando los suelos y rocas anegables, como el Solonchak y rocas de origen aluvial y lacustre, además la hidrología superficial está a muy poca distancia de los núcleos urbanos, lo que incrementa el riesgo de inundación.

Esto también ocurre en otros núcleos habitacionales que yacen sobre la Cuenca de México, tal es el caso de Iztapalapa, la delegación más poblada del país (a la cual secunda Ecatepec siendo el municipio más poblado del Estado), esta se encuentra a 2, 240 msnm, la zona urbana se ubica en una planicie lacustre, el 68% del territorio tiene un relieve plano, lo cual en conjunto con los hundimientos del suelo, incrementan el riesgo de inundaciones, las zonas con mayor riesgo son 8 colonias ubicadas al este: Ejército de Oriente zona Peñón, Ejército de Oriente zona ISSSTE, San Lorenzo Xicoténcatl, Santa Martha Acatitla Sur, Pueblo de Santa Martha Acatitla, Minerva, U. H. Solidaridad, y U. H. La Colmena, éstas inundaciones se consideran pluviales, ya que la mayoría de la delegación posee clima Templado subhúmedo con lluvias en verano, éste predomina en la Cuenca de México, excepto en el Lago de Zumpango al noreste y al centro de la cuenca en el antiguo Lago de Texcoco dónde predomina el Seco Estepario semiárido (Vera y López, 2010).

En ésta área de la Cuenca se ubica Ecatepec, por lo que las inundaciones en el municipio no son pluviales ya que el clima imperante es el seco estepario semiárido en la zona urbana y el templado sub-húmedo se encuentra sólo al oeste en la Sierra de Guadalupe, dónde el riesgo de inundación es bajo, de manera general las temperaturas están entre 15.21-21.04°C y las precipitaciones entre 553.131 – 685.049 mm anuales, siendo los meses más lluviosos: Junio, Julio y Agosto.

Por lo anterior las inundaciones en el municipio son en su mayoría de origen fluvial, es decir por desbordamiento de canales y fallas del drenaje artificial en los mismos, de igual forma que en Chalco de Díaz Covarrubias, éste municipio yace sobre el antiguo Lago de Chalco, que junto con Xochimilco conformaba una zona chinampera en la época prehispánica, sin embargo actualmente es un núcleo urbano y comercial, en el que las inundaciones son frecuentes por las características de planicie lacustre antes mencionadas, el territorio se hunde 40 cm al año (Díaz-Delgado *et al.*, 2011), de igual forma, de acuerdo con la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM), Ecatepec se hunde entre 20 y 25 cm al año, como producto del desgaste del manto acuífero del Valle de México, al que también pertenece Chalco, por lo que en ambos casos hay daños en la infraestructura del drenaje que conducen a inundaciones (Periódico HoyEstado, 2017).

Además del riesgo ambiental de inundación que existe en dichas zonas, es preciso contemplar las características de la población que habita para estimar su grado de resiliencia ante un desastre, ya que en ambos sitios la población posee marginación alta, particularmente en Ecatepec los sectores más vulnerables ante una inundación considerados en el modelo de zonificación del riesgo, fueron personas en edad de 0 a 14 años (26.35%), población con alguna discapacidad (4.31%), población senil (5.65%) y personas sin acceso a los servicios de salud pública (40%). Mientras que, Díaz-Delgado y colaboradores en 2011 contemplaron la resiliencia en función de las características de las viviendas en Chalco, para además estimar los costos directos por inundación, contemplando el índice de marginación urbana de CONAPO, ingresos económicos por familia, y los bienes en la vivienda, estimando que el costo más probable por inundación podría ascender a 33.95 millones de pesos.

Otro estudio que contempla la vulnerabilidad social ante inundación, es el realizado por Toscana y colaboradores en 2010, para el municipio de San Mateo Atenco, que pertenece a otra Cuenca Hidrográfica (Lerma-Toluca), por lo que el pasado lacustre del área *per se*, la hace ambientalmente vulnerable a inundación, la cartografía de riesgo se elaboró con base a

entrevistas a la población (cartografía participativa), y la vulnerabilidad de la población se estimó con base a indicadores socioeconómicos de ingresos, vivienda, educación y población, coincidiendo con los siguientes indicadores empleados para el presente estudio: Población total y Población Económicamente Activa (PEA), además tomaron en cuenta la población alfabetizada, los materiales de la vivienda, y características del drenaje en la misma, los resultados muestran que la vulnerabilidad muy alta se localiza al sureste del municipio en el Barrio San Lucas y San Mateo, la alta en Col. Alvaro Obregón y Barrio San Luquitas, el resto se encuentra en un nivel bajo y medio principalmente. Además, los autores denuncian la ineficacia de protección civil en el Estado de México ante las inundaciones y los desastres en general, lo cual por supuesto, también se ve reflejado en Ecatepec de Morelos.

8.2. Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación en Ecatepec de Morelos

8.2.1 Descripción de usos de suelo y vegetación municipal en 1996, 2007 y 2016.

Se identificaron doce usos de suelo y coberturas vegetales en el municipio, el uso que predominó en las tres temporalidades fue el urbano, el cual se distribuye en todo el territorio, acompañado de escasas áreas verdes o vegetación urbana, el uso industrial se distribuye del centro al suroeste, al este en el Caracol hay manchones de vegetación halófila hidrófila, pastizal halófilo y zonas sin vegetación aparente, al oeste en la Sierra de Guadalupe hay pastizal inducido a las faldas, matorral en la parte media y uso forestal en la cumbre. Por su parte el uso agrícola se concentra al norte, mientras que las corrientes de agua se encuentran ampliamente distribuidas en todo el municipio (hidrología descrita en SIGMA). En el cuadro 9, se muestra la superficie en hectáreas que ocupó cada cobertura identificada, en cada año, y en la figura 29, una comparación porcentual del territorio que ocuparon:

Cuadro 9. Comparación de superficies ocupadas por cada cobertura de 1996 a 2016			
Uso de suelo/cobertura vegetal	Superficie en ha para 1996	Superficie en ha para 2007	Superficie en ha para 2016
<i>Zona urbana</i>	8,064.09	9,503.55	10,555.38
<i>Industrial</i>	282.69	340.02	469.8
<i>Pastizal halófilo</i>	761.76	737.55	554.94
<i>Corriente de agua</i>	144.63	143.28	158.85
<i>Agricultura de riego</i>	1,132.02	983.97	623.88
<i>Agricultura de temporal</i>	1,782.54	902.07	715.86
<i>Vegetación halófila hidrófila</i>	209.88	316.53	188.82
<i>Zonas sin vegetación aparente</i>	699.30	612.18	448.2
<i>Vegetación urbana</i>	764.82	411.84	164.88
<i>Pastizal inducido</i>	535.14	174.96	429.48
<i>Forestal</i>	887.76	770.58	454.05
<i>Matorral</i>	514.35	858.15	1,055.07

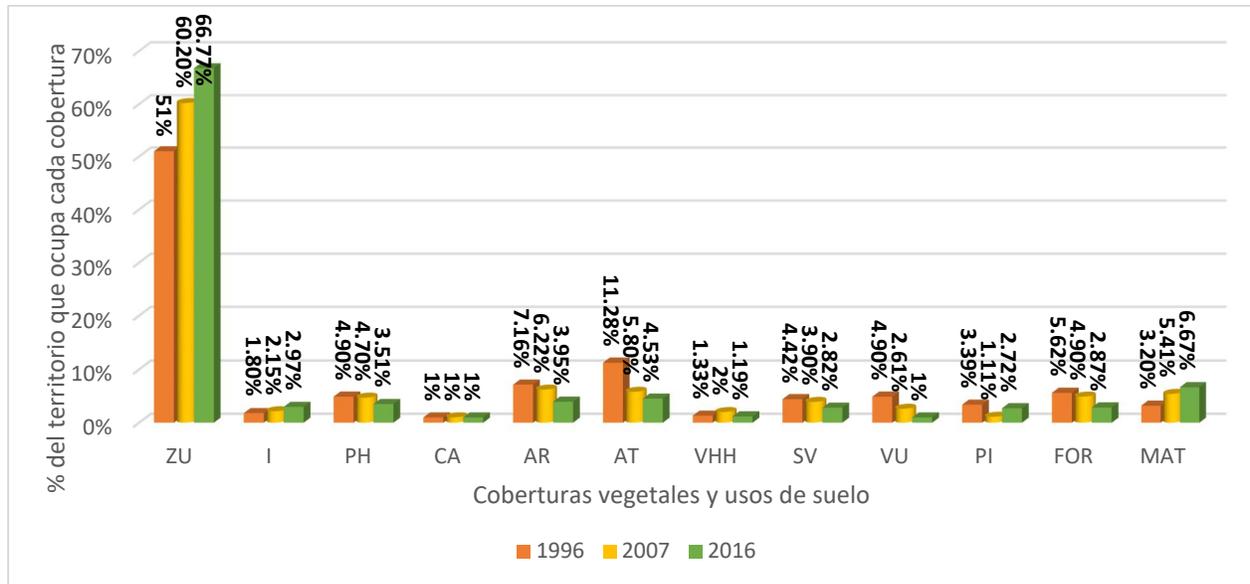


Fig. 29. Comparación de usos de suelo y vegetación en Ecatepec en 1996, 2007 y 2016. ZU= zona urbana, I= industrial, PH= pastizal halófilo, CA= corrientes de agua, AR=agricultura de riego, AT=agricultura de temporal, VHH=vegetación halófila hidrófila, SV=zonas sin vegetación aparente, VU=vegetación urbana,PI= pastizal inducido, FOR=uso forestal y MAT=matorral

8.2.2 Validación de las clasificaciones

a) Clasificación supervisada de 1996

De acuerdo con la matriz de confusión, la fiabilidad o **precisión global** de la clasificación de 1996 fue de 74%, mientras que la concordancia entre estos resultados obtenidos por el método de *máxima verosimilitud* y los datos reales para dicho año fue del 70% (**índice Kappa** 0.70). El 33.22% de los píxeles clasificados fueron omitidos por el software (error de **omisión**), por lo que la **fiabilidad de productor** es de 66.78 %; mientras que 28.46 % se debe a píxeles que fueron clasificados incorrectamente (errores de **comisión**), por lo que la **fiabilidad del usuario** es de 84.59%. El número detallado de píxeles clasificados correctamente (2,590), omitidos o comisionados para cada cobertura, se muestra en el cuadro 10, y en el mapa 19 se muestran los usos de suelo y vegetación para dicho año:

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total	%	%
Uso	ZU	I	PH	CA	AR	AT	VHH	SVA	VU	PI	FOR	MAT		Fiabilidad del productor	Error de omisión
ZU	950	0	5	101	0	5	7	8	5	0	0	0	1081	87.88	12.12
I	0	216	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	226	95.58	4.42
PH	59	4	78	11	0	6	10	2	44	0	1	0	215	36.28	63.72
CA	22	0	0	291	1	1	1	15	0	2	0	0	333	87.39	12.61
AR	7	0	0	13	164	1	0	1	0	0	0	4	190	86.32	13.68
AT	8	0	1	4	1	244	33	0	1	0	0	32	324	75.31	24.69
VHH	31	2	4	8	0	103	173	5	11	2	0	1	340	50.88	49.12
SVA	9	0	5	27	1	0	1	189	9	0	0	0	241	78.42	21.58
VU	14	2	24	3	0	7	33	0	64	2	4	0	153	41.83	58.17
PI	21	2	1	0	2	4	2	0	4	41	2	13	92	44.57	55.43
FOR	1	47	10	0	0	2	1	0	18	4	40	0	123	32.52	67.48
MAT	1	0	0	1	6	14	2	0	0	1	1	140	166	84.34	15.66
Total=3484	1123	273	128	459	175	387	263	220	156	55	55	190	2590	66.78	33.22
Fiabilidad del usuario %	84.59	79.12	60.94	63.40	93.71	63.05	65.78	85.91	41.03	74.55	72.73	73.68	71.54	Fiabilidad global	0.74/74%
Error de comisión %	15.41	20.88	39.06	36.60	6.29	36.95	34.22	14.09	58.97	25.45	27.27	26.32	28.46	Coefficiente Kappa	0.70 70%

Cuadro 10. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de 1996. Nomenclatura: ZU= ZONA URBANA, I= INDUSTRIAL, PH= PASTIZAL HALÓFILO, CA= CORRIENTES DE AGUA, AR= AGRICULTURA DE RIEGO, AT= AGRICULTURA DE TEMPORAL, VHH= VEGETACIÓN HALÓFILO HIDRÓFILO, SVA= SIN VEGETACIÓN APARENTE, VU= VEGETACIÓN URBANA, PI= PASTIZAL INDUCIDO, FOR= FORESTAL, MAT= MATORRAL.

b) Clasificación supervisada de 2007

La fiabilidad o **precisión global** de la clasificación de 2007 fue de 83%, mientras que la concordancia entre los usos de suelo y vegetación identificados por el método de *máxima verosimilitud* y los reales para dicho año 75% (**índice Kappa 0.75**). El 43.02 % de los errores se debe a píxeles que fueron omitidos por el software (error de **omisión**), por lo que la **fiabilidad de productor** es de 56.98 %; mientras que 37.01 % se debe a píxeles que fueron clasificados incorrectamente (errores de **comisión**), por lo que la **fiabilidad del usuario** es de 62.99%. El número de píxeles clasificados correctamente (6,819), omitidos y comisionados para cada cobertura se muestra en el cuadro 11, y en el mapa 20 se muestran los usos de suelo y vegetación para dicho año:

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total	%	%
Uso	ZU	I	PH	CA	AR	AT	VHH	SVA	VU	PI	FOR	MAT	Total	Fiabilidad del productor	Error de omisión
ZU	4310	3	86	49	1	20	3	1	49	0	0	31	4553	94.66	5.34
I	0	902	0	0	1	0	0	1	2	31	5	12	954	94.54	5.46
PH	23	0	379	5	0	2	2	0	1	0	0	4	416	91.10	8.90
CA	4	2	3	295	0	46	4	0	5	6	0	7	372	79.30	20.70
AR	18	5	1	13	11	5	4	0	23	3	6	4	93	11.83	88.17
AT	25	0	9	126	0	91	0	0	8	29	0	56	344	26.45	73.55
VHH	11	0	12	5	0	0	364	0	3	0	0	3	398	91.46	8.54
SVA	24	0	11	3	0	0	4	34	2	0	0	9	87	39.08	60.92
VU	88	0	13	28	0	29	1	2	41	2	0	29	233	17.60	82.40
PI	3	4	0	51	1	65	0	0	14	27	2	9	176	15.34	84.66
FOR	0	55	0	11	4	21	0	0	18	19	301	10	439	68.56	31.44
MAT	7	0	14	19	0	9	2	0	4	0	0	64	119	53.78	46.22
Total=8184	4513	971	528	605	18	288	384	38	170	117	314	238	6819	56.98	43.02
Fiabilidad del usuario %	95.50	92.89	71.78	48.76	61.11	31.60	94.79	89.47	24.12	23.08	95.86	26.89	62.99	Fiabilidad global	83%
Error de comisión %	4.50	7.11	28.22	51.24	38.89	68.40	5.21	10.53	75.88	76.92	4.14	73.11	37.01	Coefficiente Kappa	0.75 75%

Cuadro 11. Matriz de confusión de la clasificación supervisada de 2007. Nomenclatura: ZU= ZONA URBANA, I= INDUSTRIAL, PH= PASTIZAL HALÓFILO, CA= CORRIENTES DE AGUA, AR= AGRICULTURA DE RIEGO, AT= AGRICULTURA DE TEMPORAL, VHH= VEGETACIÓN HALÓFILO HIDRÓFILO, SVA= SIN VEGETACIÓN APARENTE, VU= VEGETACIÓN URBANA, PI= PASTIZAL INDUCIDO, FOR= FORESTAL, MAT= MATORRAL

c) Clasificación supervisada de 2016

La fiabilidad o **precisión global** de la clasificación de 2016 fue de 80%, mientras que la concordancia entre los usos de suelo y vegetación identificados por el método de *máxima verosimilitud* y los sitios de entrenamiento para dicho año 72% (**índice Kappa** 0.72). La razón por la que estos porcentajes no alcanzan el óptimo de 100% es porque existen errores al clasificar los píxeles, el 38.57 % de estos se debe a píxeles que fueron omitidos por el software (error de **omisión**), por lo que la **fiabilidad de productor** es de 61.43 %; mientras que 10.26 % se debe a píxeles que fueron clasificados incorrectamente (errores de **comisión**), por lo que la **fiabilidad del usuario** es de 89.74 %.

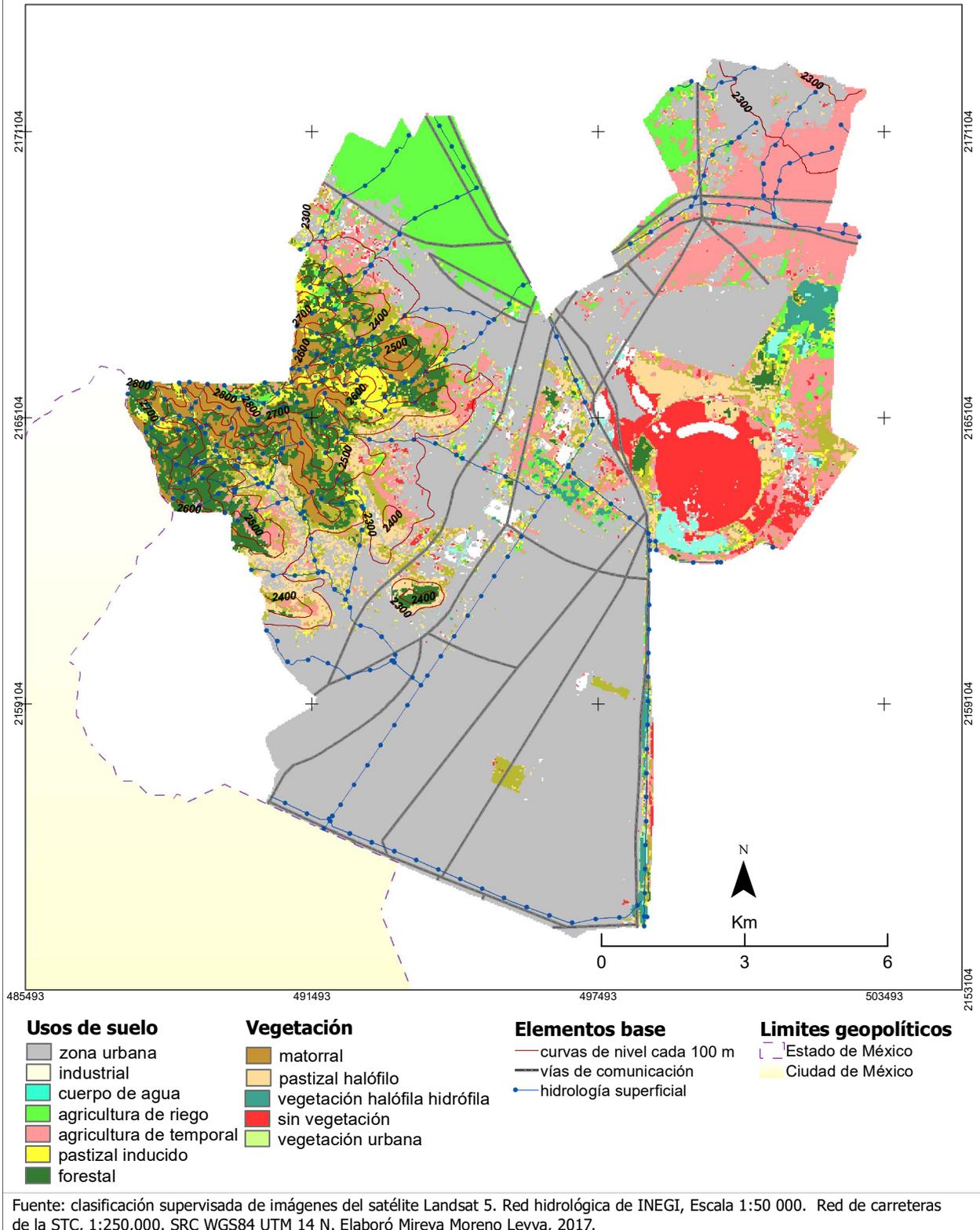
El número detallado de píxeles clasificados correctamente (1, 387), omitidos o comisionados para cada cobertura, se muestra en el cuadro 12:

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total	% Fiabilidad del productor	% Error de omisión
Uso	ZU	I	PH	CA	AR	AT	VHH	SVA	VU	PI	FOR	MAT			
ZU	656	0	3	1	1	9	13	0	3	0	0	0	686	95.63	4.37
I	0	65	0	9	13	0	0	0	1	0	0	1	89	73.03	26.97
PH	15	0	27	6	0	0	0	0	0	0	0	0	48	56.25	43.75
CA	0	10	2	20	15	0	2	0	0	0	0	0	49	40.82	59.18
AR	4	3	0	2	54	0	20	0	1	1	0	1	86	62.79	37.21
AT	6	0	0	0	1	168	1	0	0	0	0	0	176	95.45	4.55
VHH	14	0	0	0	17	0	42	0	2	0	0	0	75	56.00	44.00
SVA	1	0	0	1	0	0	0	20	0	1	0	0	23	86.96	13.04
VU	26	1	0	0	10	1	13	0	19	0	0	0	70	27.14	72.86
PI	0	2	0	0	5	0	1	1	0	15	0	1	25	60.00	40.00
FOR	9	0	0	0	1	0	13	0	3	0	6	0	32	18.75	81.25
MAT	0	6	0	0	2	0	0	0	0	2	0	18	28	64.29	35.71
total 1387	731	87	32	39	119	178	105	21	29	19	6	21	1110	61.43	38.57
Fiabilidad del usuario %	89.74	74.71	84.38	51.28	45.38	94.38	40.00	95.24	65.52	78.95	100.00	85.71	75.44	Fiabilidad global	80%
Error de comisión n%	10.26	25.29	15.62	48.72	54.62	5.62	60.00	4.76	34.48	21.05	0.00	14.29	24.56	Coefficiente Kappa	0.72 72%

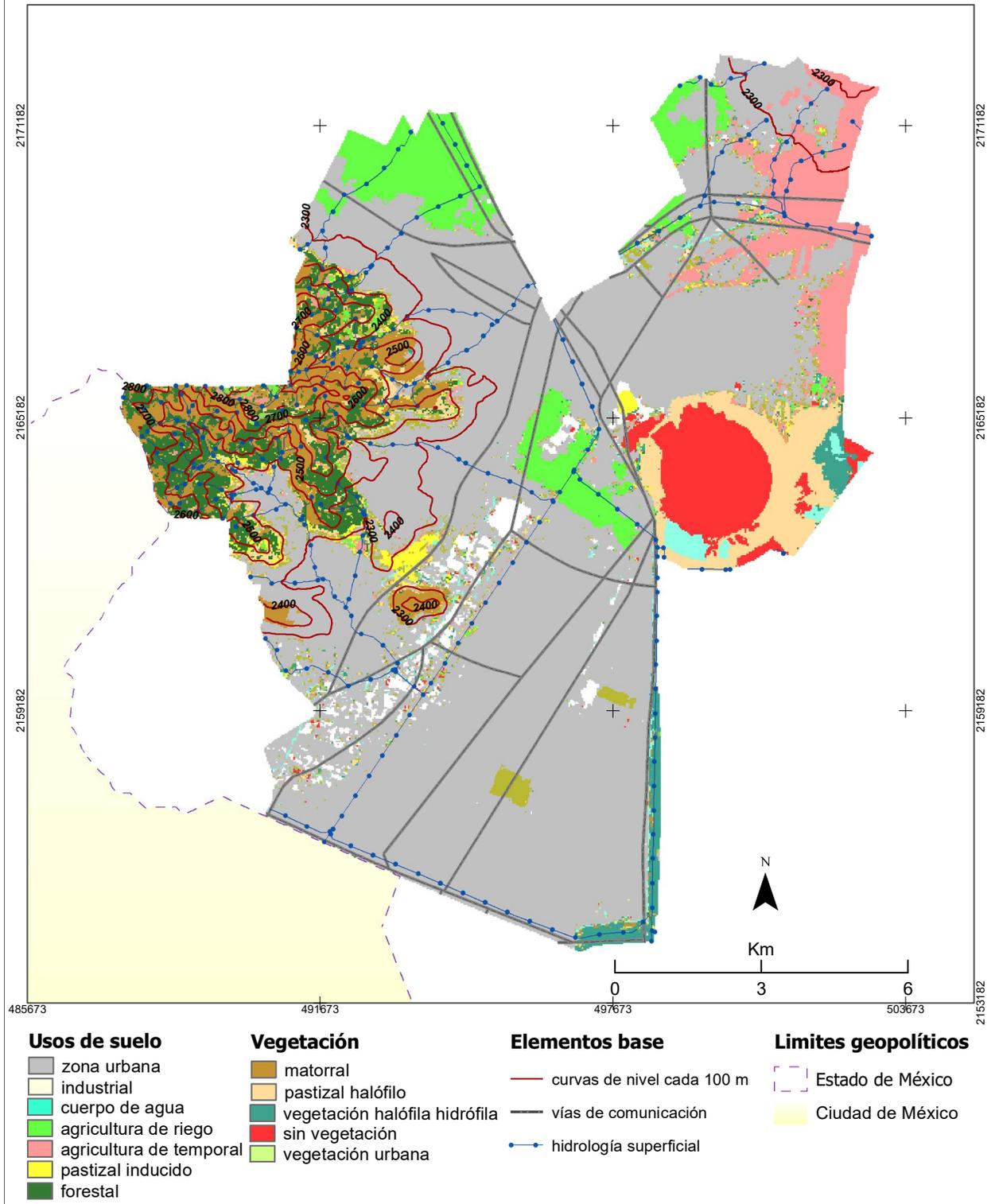
Cuadro 12. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de 2016: Nomenclatura: ZU= ZONA URBANA, I= INDUSTRIAL, PH= PASTIZAL HALÓFILO, CA= CORRIENTES DE AGUA, AR= AGRICULTURA DE RIEGO, AT= AGRICULTURA DE TEMPORAL, VHH= VEGETACIÓN HALÓFILO HIDRÓFILO, SVA= SIN VEGETACIÓN APARENTE, VU= VEGETACIÓN URBANA, PI= PASTIZAL INDUCIDO, FOR= FORESTAL, MAT= MATORRAL.

Anexo cartográfico 4. Clasificación supervisada de cambio de uso de suelo y vegetación

Mapa 19. Usos de suelo y vegetación presentes en Ecatepec de Morelos, 1996.



Mapa 20. Usos de suelo y vegetación presentes en Ecatepec de Morelos, 2007.



Fuente: clasificación supervisada de imágenes del satélite Landsat 5. Obtenidas de USGS GLOVIS. Red hidrológica de INEGI, Escala 1:50 000. Red de carreteras de la STC, 1:250,000. SRC WGS84 UTM 14 N. Elaboró Mireya Moreno Leyva, 2017.

8.2.3 Descripción de errores de omisión y comisión en las clasificaciones supervisadas

Las clasificaciones de 1996, 2007 y 2016 tuvieron una precisión global de 74%, 83% y 80% respectivamente, mientras que la concordancia entre la información de referencia o uso real de suelo y la clasificación supervisada (coeficiente Kappa) fue de 70% para 1996, 75% para 2007 y 72% para 2016, lo cual indica que las clasificaciones supervisadas fueron “buenas” o aceptables, dado que están entre el 60-80% de concordancia con la realidad (ver cuadro 6, López y Pita, 2001).

Partiendo de esta valoración de la fiabilidad, los errores son considerables cuando rebasan el 40%. De manera particular, para el año 1996 las coberturas con más error por omisión o falsos negativos fueron: pastizal halófilo (63.72%), vegetación halófila hidrófila (49.12%), pastizal inducido (55.43%), forestal (67.48%), las cuales fueron comisionadas o agrupadas en vegetación urbana, esta cobertura a su vez tuvo 58.17% de error por omisión y 58.97% de error por comisión y fue clasificada en las categorías antes mencionadas. Lo anterior quizá se debe a que la vegetación urbana está compuesta por árboles, arbustos y pastos, por lo que las firmas espectrales de cada tipo de vegetación resultan iguales en el caso del uso forestal y pastizal inducido o similares en el caso del pastizal halófilo y la vegetación halófila hidrófila, estas poseen un color verde intenso por la humedad (crecen en zonas aledañas a la hidrología), lo cuál dificultó la distinción con otros tipos de vegetación ya que la imagen satelital fue obtenida en temporada de lluvias (mayo).

De igual forma para 2007, la resolución temporal de las imágenes influyó en la distinción de zonas agrícolas de temporal y de riego, teniendo errores de 88.17% de omisión para agricultura de riego, así como 73.55% de omisión y 68.40% de comisión en la de temporal, debido a que las imágenes fueron captadas en época de lluvias, y la humedad en ambos cultivos asemeja su firma espectral. Por otra parte, las zonas sin vegetación aparente tuvieron 60.92% de omisión, el pastizal inducido tuvo 84.66% de omisión y 76.92% de comisión a uso forestal, el matorral tuvo 46.22% de omisión y 73.11% de comisión, estas coberturas fueron agrupadas en vegetación urbana, probablemente debido a la similitud en las firmas espectrales, ya que se compone de pastos, arbustos y árboles, teniendo por tanto 82.40% de omisión y 75.88% de comisión a pastizal inducido, matorral y uso forestal, principalmente.

Para dicho año, las corrientes de agua presentaron 51.24% de comisión, siendo clasificados como agricultura, pastizal inducido y vegetación urbana, lo anterior puede asociarse a: la presencia de vegetación riparia aledaña a la hidrología, a que los canales o ríos presentes en el

municipio son viejos, estos se caracterizan por no tener caudal rápido (prácticamente nulo, al ubicarse en zonas de planicie), son de profundidad baja y además, tienen alto grado de eutrofización, que es el aumento de materia orgánica o biomasa en el agua, éste aumento se debe al alto contenido de nitrógeno y fósforo, puede darse por condiciones naturales o por contaminación agrícola o industrial (Aguilar, 2010), favoreciendo la proliferación de algas que le dan una coloración verdosa al agua dificultando la adecuada clasificación, lo anterior coincide con lo reportado por Macedo *et al.*, 2010, que señalan la dificultad de clasificar cuerpos de agua poco profundos o no cristalinos, porque sus firmas espectrales pueden ser parecidas a la de pastos u otras coberturas vegetales.

Esto también se observó en la clasificación del 2016, en esta las corrientes de agua tuvieron 59.18% de omisión y 48.72% de comisión o agrupamiento en los tipos de vegetación ya mencionados. Otros errores considerables se observaron en las coberturas: pastizal halófilo 43.75% de omisión; agricultura de riego 54.62% de comisión y vegetación halófila hidrófila con 60% de comisión; estas fueron clasificadas como vegetación urbana, debido a las firmas espectrales similares como ya se mencionó.

8.3 Dinámica de cambio de usos de suelo y vegetación

8.3.1 Descripción de cambios de 1996 a 2007

Durante éste período se observó un incremento en los usos antrópicos, 8060.1 ha **permanecieron** ocupadas por la **zona urbana**, la cual **augmentó** en 2,496.65 hectáreas (23.65%), *ver cuadro 13*, 130.2 de éstas hectáreas provenían del uso industrial, 494.9 ha pertenecían a pastizal halófilo, 42.8 ha a corrientes de agua, 474.4 ha a agricultura de riego, 712.8 ha a agricultura de temporal, 47 ha a vegetación halófila hidrófila y 92 ha a zonas sin vegetación aparente, 262.3 ha a vegetación urbana, 172.6 ha a pastizal inducido, 59.4 a uso forestal y 8.1 a matorral, *ver cuadro 13*. Ésta zona **perdió** 877.8 ha (9.82%), las cuales pasaron principalmente a uso industrial (256.5 ha), uso agrícola (89.4 ha de riego y 120.7 de temporal), zonas sin vegetación (34.2 ha), vegetación urbana (142.8 ha) y pastizal inducido (38.8 ha), *ver cuadro 13*. Por su parte, la **vegetación urbana permaneció** en 117.3 ha, **augmentó** en 340 ha (74.35%), ésta superficie provino en su mayoría de: zona urbana (142.8 ha), industrial (4.1 ha), agricultura de riego (10.8 ha), agricultura de temporal (70.2 ha), zonas sin vegetación (5.6 ha) y pastizal inducido (17.8 ha). Y **perdió** 424.4 ha que cambiaron a zona urbana (262.3 ha), industrial (5.4 ha), agricultura de riego (54.4 ha), agricultura de temporal (35 ha), zonas sin vegetación (14.6 ha), y pastizal inducido (52.7 ha), *ver cuadro 13 y figura 30*.

El área **industrial** (localizada del centro al suroeste municipal) **augmentó** en 304.9 ha (80.70%), y 72.9 ha **permanecieron** con este uso. La superficie ganada provino de: zona urbana (265 ha), pastizal halófilo (5.3 ha), corrientes de agua (4.8 ha), agricultura de riego (4 ha), agricultura de temporal (12.2 ha), vegetación halófila hidrófila (2 ha), zonas sin vegetación (11.2 ha), vegetación urbana (5.4 ha), pastizal inducido (2.5 ha), uso forestal (0.8 ha) y matorral (0.2 ha), *ver cuadro 13*. En menor medida **perdió** 76.79 ha (76.79%), las cuales pasaron principalmente a uso urbano (130.2 ha), agricultura de riego (18.8 ha), agricultura de temporal (4 ha), zonas sin vegetación (50.4 ha), vegetación urbana (4.1 ha) y pastizal inducido (1.2 ha), *ver cuadro 13 y figura 30*.

Como resultado de la expansión de la zona urbana e industrial hubo cambios al este municipal, en el área aledaña al Caracol, esto se debe principalmente a la construcción del fraccionamiento Las Américas, las coberturas involucradas son: **pastizal halófilo** (180.1 ha **permanecieron** con ésta cobertura), **augmentó** en 180.1 ha (22%), provenientes principalmente de: vegetación halófila hidrófila (6.9 ha), zonas sin vegetación (113.5 ha), y pastizal inducido (59.7 ha), además **perdió** 612.1 ha (72.35%), que pasaron principalmente a: zona urbana (494.9 ha), industrial (5.3 ha), agricultura de riego (29.9 ha), agricultura de temporal (13.5 ha), vegetación halófila hidrófila (23.8 ha), zonas sin vegetación (25.5 ha), vegetación urbana (62.7 ha), y pastizal inducido (19.2 ha), *ver cuadro 13*; **Vegetación halófila hidrófila** (34.9ha **permanecieron** con el mismo uso), **augmentó** en 112 ha (31.85%), provenientes en su mayoría de: pastizal halófilo (23.8 ha), agricultura de riego (7.3 ha), agricultura de temporal (64.8 ha) y zonas sin vegetación (16.1 ha), además **perdió**: 161 ha que pasaron a: zona urbana (47 ha), industrial (2 ha), pastizal halófilo (6.9 ha), agricultura de riego (33.1 ha), agricultura de temporal (70.8 ha), y zonas sin vegetación (1.2 ha), *ver cuadro 13*.

Éstas **zonas sin vegetación permanecieron** en 505.7 ha, **augmentaron** 173.8 ha (22.58%), en la zona urbana (34.2 ha) e industrial (50.4 ha), y en dónde antes había: pastizal halófilo (25.5 ha), corriente de agua (16.7 ha), agricultura de riego (0.8 ha), agricultura de temporal (28.4 ha), vegetación halófila hidrófila (1.2 ha), vegetación urbana (14.6 ha), pastizal inducido (1.8 ha), uso forestal (0.1 ha) y matorral (0.1 ha); se redujeron o **perdieron** 259.2 ha: 92 ha que pasaron de ser suelo desnudo a zona urbana, 11.2 ha que pasaron al uso industrial, respecto a los tipos de vegetación se recuperaron: 113.5 ha de pastizal halófilo, 11.8 ha de agricultura de riego, 4.6 ha de agricultura de temporal, 16.1 ha de vegetación halófila hidrófila, 5.6 ha de vegetación urbana, y 4.4 de pastizal inducido, *ver cuadro 13 y figura 31*. Por su parte, las **corrientes de agua** o hidrología, se mantuvieron constantes, aunque tuvieron ciertas fluctuaciones por la

resolución temporal de las imágenes y por los errores de clasificación al categorizar cuerpos de agua turbios, poco profundos o con algas, como ya se mencionó en la sección anterior (Macedo *et al.*, 2010).

Por otra parte, al norte del municipio, el **uso agrícola aumentó**: la **agricultura de riego permaneció** en 665 ha, **ganó** 412.8 ha (37.79%), éstas provenían de: zona urbana (89.4 ha), uso industrial (18.8 ha), pastizal halófilo (29.9 ha), vegetación halófila hidrófila (33.1ha), vegetación urbana (54.4 ha), pastizal inducido (21.4 ha) y en mayor medida de la agricultura de temporal (168.6 ha); además **perdió** 560.9 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (474.4 ha), industrial (4 ha), agricultura de temporal (58.1 ha), vegetación halófila hidrófila (7.3 ha), zonas sin vegetación (0.8 ha), vegetación urbana (10.8), y pastizal inducido (5.5 ha), *ver cuadro 13*.

La **agricultura de temporal permaneció** en 668.6 ha, **incrementó** en 412.8 ha (37.79%), 120.7 ha provenían de zona urbana, 4 ha del uso industrial, 13.5 ha de pastizal halófilo, 58.1 ha de agricultura de riego, 70.8 ha de vegetación halófila hidrófila, 4.6 ha de zonas sin vegetación, 35 ha de vegetación urbana, y 25.7 de pastizal inducido. Y **perdió** 1,087 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (712.8 ha), industrial (12.2 ha), agricultura de riego (168.6 ha), vegetación halófila hidrófila (64.8 ha), zonas sin vegetación (28.4 ha), vegetación urbana (70.2 ha) y pastizal inducido (30.7 ha), *ver cuadro 13 y fig. 30*.

En la Sierra de Guadalupe (oeste), **permaneció** el uso **forestal** en las partes altas en 504.6 ha, **aumentó** en 351.1 ha (41.03 %), provenientes principalmente de matorral (94.8 ha), y pastizal inducido (87 ha), lo anterior supone un proceso de recuperación. Y **perdió** 279.1 ha, las cuales pasaron a zona urbana (59.4 ha), industrial (0.8 ha), zonas sin vegetación (0.1 ha), pastizal inducido (17.9 ha) y matorral (261.1 ha), lo anterior es un proceso de deforestación, (*ver cuadro 13 y figura 30*).

Por su parte, el **matorral** distribuido en la parte media de la Sierra, **permaneció** en 438.8 ha, **aumentó** en 425.7 ha (53.95%), provenientes en su mayoría del uso forestal (261.1 ha), y el pastizal inducido (164.6 ha), lo anterior evidencia un proceso de sucesión vegetal o matorralización, además **perdió** 106 ha, las cuales pasaron a zona urbana (8.1 ha), uso industrial (0.2 ha), zonas sin vegetación (0.1 ha). uso forestal (98.8 ha), y pastizal inducido (2.8 ha) (*ver cuadro 13 y figura 31*). A las faldas de la sierra predominó el **pastizal inducido**, éste **permaneció** en 18.6 ha, **aumentó** en 175.7 ha, las cuáles provenían de zona urbana (38.8 ha), uso industrial (1.2 ha), pastizal halófilo (19.2 ha), agricultura de riego (5.5 ha), agricultura de

temporal 30.7 ha, zonas sin vegetación (4.4 ha), vegetación urbana (52.7 ha), uso forestal (17.9 ha), y matorral (2.8 ha). Y **perdió** 553.1 ha, las cuales pasaron a zona urbana (172.6 ha), uso industrial (2.5 ha), pastizal halófilo (59.7 ha), agricultura de riego (21.4 ha), agricultura de temporal (25.7 ha), zonas sin vegetación (1.8 ha), vegetación urbana (17.8 ha), uso forestal (87 ha) y matorral 164.6 ha (*ver cuadro 13 y figura 30*).

Cuadro 13. Matriz de transición de uso de suelo (1996-2007)

USO / COBER-TURA	ZU	I	PH	CA	AR	AT	VHH	SV	VU	PI	F			TOTAL 2007	PÉRDIDAS	%
ZU	8060.1	256.5			89.4	120.7		34.2	142.8	38.8				8937.9	877.8	9.82
I	130.2	72.9			18.8	4		50.4	4.1	1.2				314.1	241.2	76.79
PH	494.9	5.3	130.6		29.9	13.5	23.8	25.5		19.2				846	612.1	72.35
CA	42.8	4.8		47.7				16.7						160.7	64.3	40.01
AR	474.4	4			665	58.1	7.3	0.8	10.8	5.5				1253.2	560.9	44.76
AT	712.8	12.2			168.6	668.6	64.8	28.4	70.2	30.7				1975.2	1087.7	55.07
VHH	47	2	6.9		33.1	70.8	34.9	1.2						233.1	161	69.07
SV	92	11.2	113.5		11.8	4.6	16.1	505.7	5.6	4.4				776.6	259.2	33.38
VU	262.3	5.4			54.4	35		14.6	117.3	52.7				849.3	424.4	49.97
PI	172.6	2.5	59.7		21.4	25.7		1.8	17.8	18.6	87	164.6		594.6	553.1	93.02
F	59.4	0.8						0.1		17.9	504.6	261.1		985.6	339.3	34.43
M	8.1	0.2						0.1		2.8	94.8	438.8		570.4	106	18.58
TOTAL 1996	10556.6	377.8	818.5	159.2	1092.4	1001	351.6	679.5	457.3	194.3	855.7	952.8		11264.8		
GANANCIAS	2496.5	304.9	180.1	0	427.4	353.5	112	173.8	340	175.7	351.1	514				
%	23.65	80.70	22.00	0.00	37.79	31.10	31.85	25.58	74.35	90.43	41.03	53.95				

Nomenclatura de clases: ZU= zona urbana; I=industrial; PH= pastizal halófilo; CA= cuerpo de agua; AR= agricultura de riego; AT=agricultura de temporal; VHH= vegetación halófila hidrófila; SV= zonas sin vegetación aparente; VU= vegetación urbana; PI= pastizal inducido; FOR= forestal y MAT= matorral

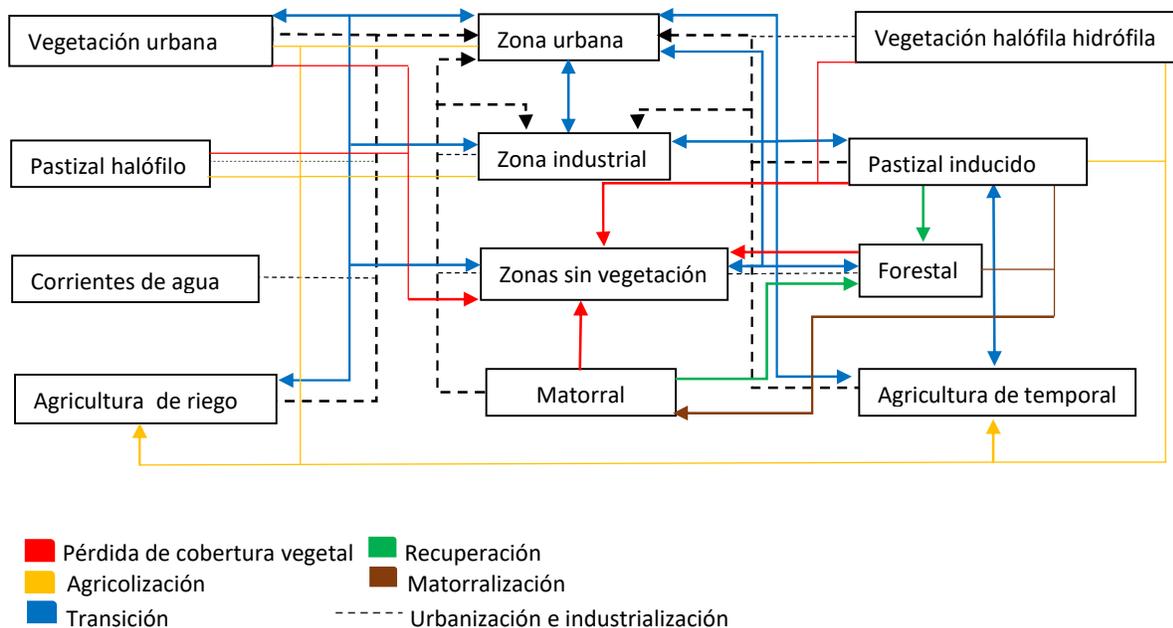


Fig. 30. Principales cambios de uso de suelo y vegetación entre 1996 y 2007.

8.3.2 Descripción de cambios de 2007 a 2016

En éste período la **zona urbana permaneció** en 9,598 ha, **creció** aproximadamente 2,065.3 ha (17.71 %), 127.6 ha de ésta superficie pertenecían a uso industrial, 108.9 ha a pastizal halófilo, 64.4 ha a corrientes de agua, 675 ha a agricultura de riego, 609.3 ha a agricultura de temporal, 71.6 ha a vegetación halófila hidrófila, 38.1 ha a zonas erosionadas, 258.3 ha a vegetación urbana, 81.7 ha a pastizal inducido, 9.4 ha a uso forestal y 21 ha a matorral. Ésta zona **perdió** 816.1 ha (7.84%), ésta superficie provino de uso industrial (220.9 ha), agricultura de riego (252 ha), agricultura de temporal (153.3 ha), zonas sin vegetación (46.9 ha), vegetación urbana (61.7 ha), y pastizal inducido (81.3 ha), *ver cuadro 14*.

Por su parte, la **vegetación urbana permaneció** en 50.7 ha, **ganó** 111.1 ha (68.67%), ésta superficie provino de la zona urbana (61.7 ha), industrial (4.6 ha), agricultura de riego (14.1 ha), agricultura de temporal (6.4 ha), zonas sin vegetación (0.8 ha), y pastizal inducido (6.6 ha). Y **perdió** 405.9 ha (88.90%), las cuales pasaron a zona urbana (258.3 ha), industrial (11.9 ha), agricultura de riego (19.8 ha), agricultura de temporal (42.9 ha), vegetación halófila hidrófila (1.8 ha), zonas sin vegetación (7.9 ha), y pastizal inducido (21.8 ha), *ver cuadro 14 y figura 31*.

A la par de la urbanización se observa una transición económica de las actividades primarias a las secundarias, por lo que el uso **industrial** (distribuido del centro del suroeste) **permaneció**

en 213.6 ha, **augmentó** en 306 ha (58.89%), ésta superficie provino de la zona urbana (220.9 ha), pastizal halófilo (4.7 ha), corrientes de agua (5.5 ha), agricultura de riego (19 ha), agricultura de temporal (12.5 ha), vegetación halófila hidrófila (10.5 ha), zonas sin vegetación (7.1 ha), vegetación urbana (11.9 ha), pastizal inducido (4.8 ha), uso forestal (4.4 ha) y matorral (4.7 ha). Y **perdió** 159.7 ha, las cuales pasaron a zona urbana (127.6 ha), agricultura de riego (16.2 ha), agricultura de temporal (8.5 ha), zonas sin vegetación (1.6 ha), vegetación urbana (4.6 ha), pastizal inducido (1.2 ha), y matorral (0.1 ha) o 1 km².

Como resultado de la expansión de la zona urbana e industrial continuaron los cambios al este municipal, en la zona aledaña al Caracol, las coberturas involucradas son: **pastizal halófilo** (213.1 ha) **permanecieron** con ésta cobertura), **augmentó** en 168.8 ha (44.20%), provenientes principalmente de: vegetación halófila hidrófila (54.8 ha), zonas sin vegetación (101.2 ha), y pastizal inducido (12.8 ha), además **perdió** 382.3 ha que pasaron principalmente a: zona urbana (108.9 ha), industrial (4.7 ha), agricultura de riego (33 ha), agricultura de temporal (84.3 ha), vegetación halófila hidrófila (47 ha), zonas sin vegetación (19.8 ha), vegetación urbana (16.9 ha), y pastizal inducido (67.7 ha), *ver cuadro 14 y figura 31*.

Vegetación halófila hidrófila (77.5 ha **permanecieron** con el mismo uso), **augmentó** en 69.1 ha (47.14%), provenientes en su mayoría de: pastizal halófilo (47 ha), agricultura de riego (0.6 ha), agricultura de temporal (2.6 ha) y zonas sin vegetación (18.9 ha), además **perdió** 189.4 ha que pasaron a: zona urbana (71.6 ha), industrial (10.5 ha), pastizal halófilo (54.8 ha), agricultura de riego (8.7 ha), agricultura de temporal (41.2 ha), y zonas sin vegetación (2.6 ha), *ver cuadro 14*; éstas **zonas sin vegetación permanecieron** en 398.3 ha, **augmentaron** 97 ha (19.58%), en la zona urbana (46.9 ha) e industrial (1.6 ha), y en dónde antes había: pastizal halófilo (19.8 ha), corriente de agua (14 ha), agricultura de riego (1.8 ha), agricultura de temporal (0.6 ha), vegetación halófila hidrófila (2.6 ha), vegetación urbana (7.9 ha), pastizal inducido (0.1 ha), uso forestal (0.8 ha) y matorral (0.9 ha); se redujeron o **perdieron** 218.1 ha: 38.1 ha que pasaron de ser suelo desnudo a zona urbana, 7.1 ha que pasaron al uso industrial, respecto a los tipos de vegetación se recuperaron: 101.2 ha de pastizal halófilo, 25.1 ha de agricultura de riego, 24.1 ha de agricultura de temporal, 18.9 ha de vegetación halófila hidrófila, 0.8 ha de vegetación urbana, y 2.8 de pastizal inducido, *ver cuadro 14 y figura 31*.

Por su parte, las **corrientes de agua** o hidrología, tuvieron ciertas fluctuaciones por la resolución temporal de las imágenes y por los errores de clasificación al categorizar cuerpos de agua turbios, poco profundos o con algas, como ya se mencionó en la sección anterior (Macedo

et al., 2010), por lo que las transiciones que muestra *el cuadro 14* para ésta categoría no son posibles espacialmente.

Al norte del municipio, hubo cambios en el **uso agrícola** del suelo, con una tendencia a la disminución, 278.1 ha **permanecieron** como **agricultura de riego**, ésta **ganó** 392 ha (58.50%), las cuales provenían principalmente de: zona urbana (252 ha), uso industrial (16.2 ha), pastizal halófilo (33 ha), vegetación halófila hidrófila (8.7 ha), vegetación urbana (19.8 ha), pastizal inducido (17.2 ha) y de la agricultura de temporal (20 ha); además **perdió** 769.3 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (675 ha), industrial (19 ha), pastizal halófilo (20.1 ha), agricultura de temporal (28.8 ha), vegetación halófila hidrófila (0.6 ha), zonas sin vegetación (1.8 ha), vegetación urbana (14.1), y pastizal inducido (30 ha), *ver cuadro 14*.

La **agricultura de temporal permaneció** en 299.4 ha, **incrementó** en 400.2 ha (57.20%), 153.3 ha provenían de zona urbana, 8.5 ha del uso industrial, 84.3 ha de pastizal halófilo, 28.8 ha de agricultura de riego, 41.2 ha de vegetación halófila hidrófila, 24.1 ha de zonas sin vegetación, 42.9 ha de vegetación urbana, y 17.1 de pastizal inducido. Y **perdió** 684.4 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (609.3 ha), industrial (12.5 ha), agricultura de riego (20 ha), vegetación halófila hidrófila (2.6 ha), zonas sin vegetación (0.6 ha o 6 km²), vegetación urbana (6.4 ha) y pastizal inducido (33 ha), *ver cuadro 14 y figura 31*.

En la Sierra de Guadalupe (oeste), **permaneció** el uso **forestal** en las partes altas en 94.6 ha, **augmentó** en 336.4 ha (78.05%), provenientes principalmente de matorral (333.4 ha), pastizal inducido (2.5 ha) y vegetación urbana (0.4 ha), lo anterior supone un proceso de recuperación. Y **perdió** o se deforestaron 617.3 ha, las cuales pasaron a zona urbana (9.4 ha), industrial (4.4 ha), zonas sin vegetación (0.8%), vegetación urbana (6.2 ha), pastizal inducido (135.5 ha) y matorral (467.2 ha). Por su parte, el **matorral** distribuido en la parte media de la Sierra, **permaneció** en 405.2 ha, **augmentó** en 506.6 ha (55.56%), provenientes en su mayoría del uso forestal (467.2 ha), vegetación urbana (15.6 ha) y el pastizal inducido (23.8 ha), lo anterior puede explicarse por un proceso de sucesión vegetal o matorralización, además **perdió** 86.71 ha, que pasaron a zona urbana (21 ha), uso industrial (4.7 ha), pastizal inducido (70.3 ha), zonas sin vegetación (0.9 ha) y uso forestal (333.4 ha), *ver cuadro 14 y figura 31*.

A las faldas de la sierra predominó el **pastizal inducido**, **permaneció** en 23.6 ha, **ganó** 443.6 ha, las cuales pertenecían a zona urbana (81.3 ha), industrial (1.2 ha), pastizal halófilo (67.7 ha), agricultura de riego (30 ha), agricultura de temporal (33 ha), zonas sin vegetación aparente (2.8 ha), vegetación urbana (21.8 ha), uso forestal (135.5 ha) y matorral (70.3 ha). Y **perdió**

166.6 ha, las cuales pasaron a zona urbana (81.7 ha), industrial (4.8 ha), pastizal halófilo (12.8 ha), agricultura de riego (17.2 ha), agricultura de temporal (17.1 ha), zonas sin vegetación aparente (0.1 ha), vegetación urbana (6.6 ha), usp forestal (2.5 ha), y matorral (476.2 ha), ver cuadro 14 y figura 31.

Cuadro14. Matriz de transición de uso de suelo de 2007 a 2016.

USO / COBER-TURA	N	-	PH	CA	AR	AT	VHH	SV	VU	PI	F	M	TOTAL 2016	PÉRDIDAS	%
ZU	9598	220.9			252	153.3		46.9	61.7	81.3			10414.1	816.1	7.84
I	127.6	213.6			16.2	8.5		1.6	4.6	1.2			373.3	159.7	42.78
PH	108.9	4.7	213.1		33	84.3	47	19.8	16.9	67.7			595.4	382.3	64.21
CA	64.4	5.5		11.7				14					95.6	83.9	87.76
AR	675	19			278.1	28.8	0.6	1.8	14.1	30			1047.4	769.3	73.45
AT	609.3	12.5			20	299.4	2.6	0.6	6.4	33			983.8	684.4	69.57
VHH	71.6	10.5	54.8		8.7	41.2	77.5	2.6					266.9	189.4	70.96
SV	38.1	7.1	101.2		25.1	24.1	18.9	398.3	0.8	2.8			616.4	218.1	35.38
VU	258.3	11.9			19.8	42.9		7.9	50.7	21.8	0.4	15.6	429.3	378.6	88.19
PI	81.7	4.8	12.8		17.2	17.1		0.1	6.6	23.6	2.5	23.8	190.2	166.6	87.59
F	9.4	4.4						0.8		135.5	94.6	467.2	711.9	617.3	86.71
M	21	4.7						0.9		70.3	333.4	405.2	835.5	430.3	51.50
TOTAL 2007	11663.3	519.6	381.9	11.7	670.1	699.6	146.6	495.3	161.8	467.2	430.9	911.8	11663.8		
GANANCIAS	2065.3	306	168.8	0	392	400.2	69.1	97	111.1	443.6	336.3	506.6			
%	17.71	58.89	44.20	0.00	58.50	57.20	47.14	19.58	68.67	94.95	78.05	55.56			

Nomenclatura de clases: ZU= zona urbana; I=industrial; PH= pastizal halófilo; CA= cuerpo de agua; AR= agricultura de riego; AT=agricultura de temporal; VHH= vegetación halófila hidrófila; SV= zonas sin vegetación aparente; VU= vegetación urbana; PI= pastizal inducido; FOR= forestal y MAT= matorral

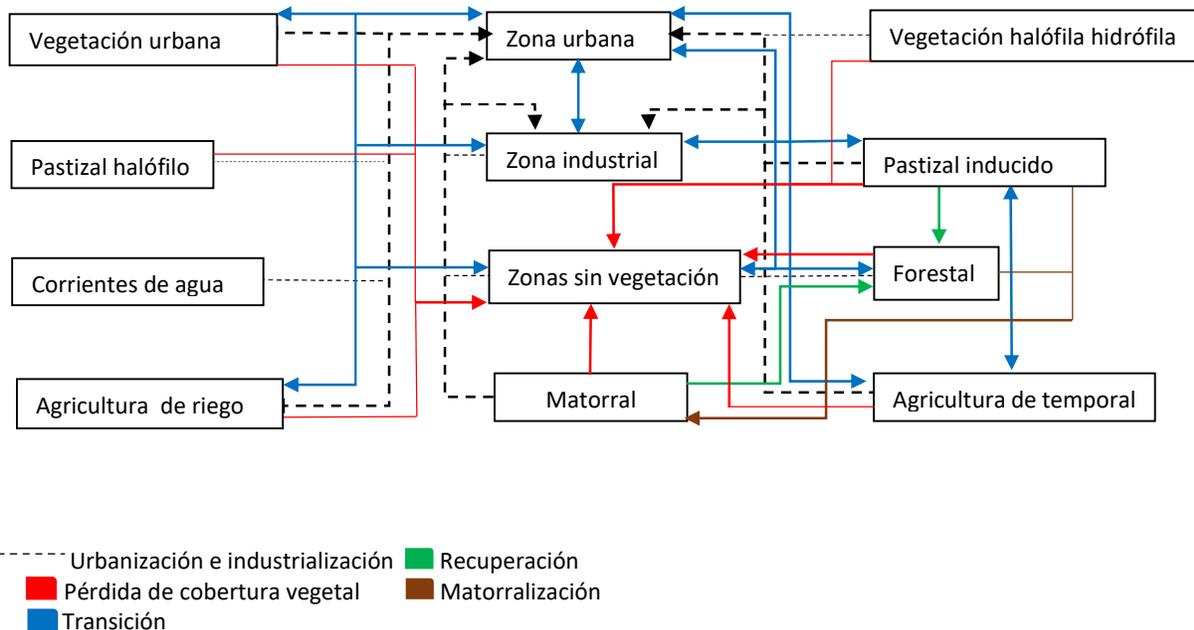


Fig. 31. Principales cambios de uso de suelo y vegetación de 2007 a 2016.

8.3.3 Descripción de cambios en el período completo de análisis (1996-2016)

En el período completo de análisis (1996-2016), 7998.7 ha **permanecieron** con uso urbano, **augmentó** en aproximadamente 3,673.9 ha en ésta **zona urbana** (31.47%), de acuerdo con la estimación de la matriz de transición la mayor parte de ésta superficie provino de: uso industrial (132.4 ha), 568.6 ha de pastizal halófilo, 55.1 ha de cuerpo de agua, 852.5 ha de agricultura de riego, 1,209.4 ha de agricultura de temporal, 160.6 ha de vegetación halófila hidrófila, 119.8 ha de zonas sin vegetación, 317.6 ha de vegetación urbana, 202.7 ha de pastizal inducido, 44.7 ha de uso forestal y 10.5 ha de matorral (*ver cuadro 15*). Y **perdió** 772.8 ha, las cuales pasaron a uso industrial (355.3 ha), agricultura de riego (126.8 ha), agricultura de temporal (167.1 ha), zonas sin vegetación aparente (45.6 ha), vegetación urbana (60.6 ha), y pastizal inducido (17.4 ha), *ver cuadro 15*.

Por su parte, el uso **industrial** y la presencia de fábricas en el municipio **permaneció** en 76.4 ha, **augmentó** en promedio 443.2 ha de superficie 85.30%, la cual provino de: la zona urbana (355.3 ha), pastizal halófilo (11.7 ha), corrientes de agua (4.9 ha), agricultura de riego (9.8 ha), agricultura de temporal (21.7 ha), vegetación halófila hidrófila (2.5 ha), zonas sin vegetación (12.5 ha), vegetación urbana (11.8), pastizal inducido (4.2), uso forestal (4.8 ha) y matorral (4 ha). Y **perdió** 236.4 ha, las cuales pasaron a zona urbana (132.4 ha), pastizal halófilo (23.2 ha), corrientes de agua (5.9 ha), agricultura de riego (9.8 ha), agricultura de temporal (21.7),

vegetación halófila hidrófila (2.5 ha), zonas sin vegetación aparente (12.5 ha), vegetación urbana (11.8 ha), pastizal inducido (4.2 ha), uso forestal (4.8 ha) y matorral (4 ha). Y perdió 198.7 ha las cuales pasaron a zona urbana (132.4 ha), agricultura de riego (12.9 ha), agricultura de temporal (23 ha), zonas sin vegetación (23.8 ha), vegetación urbana (3.2 ha), y pastizal inducido 83.4 ha), *ver cuadro 15*.

Al norte del municipio, 305.8 ha **permanecieron** como **agricultura de riego**, ésta **ganó** 377.9 ha (55.27%), las cuales provenían principalmente de: zona urbana (126.8 ha), uso industrial (12.9 ha), pastizal halófilo (26.7 ha), agricultura de temporal (90.5), vegetación halófila hidrófila (5.1 ha), zonas sin vegetación (34.7 ha), vegetación urbana (45.4 ha), pastizal inducido (18.4 ha), uso forestal (11.8 ha) y matorral (3.4 ha); además **perdió** 932.2 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (852.5 ha), industrial (9.8 ha), pastizal halófilo (7.5 ha), agricultura de temporal (16.1 ha), vegetación halófila hidrófila (1.8 ha), zonas sin vegetación (2.6 ha), vegetación urbana (7), y pastizal inducido (26.5 ha), *ver cuadro 15*.

La **agricultura de temporal permaneció** en 305.8 ha, **incrementó** en 306.5 ha (54.10%), 167.1 ha provenían de zona urbana, 23 ha del uso industrial, 52 ha de pastizal halófilo, 16.1 ha de agricultura de riego, 19 ha de vegetación halófila hidrófila, 29.8 ha de zonas sin vegetación, 58.8 ha de vegetación urbana, y 34.4 de pastizal inducido. Y **perdió** 1464.5 ha, las cuales pasaron a: zona urbana (1209.4 ha), industrial (21.7 ha), agricultura de riego (90.5 ha), vegetación halófila hidrófila (47.8 ha), zonas sin vegetación (9.1 ha), vegetación urbana (15.3 ha) y pastizal inducido (70.7 ha), *ver cuadro 15*.

La dinámica de cambio en los usos antrópicos (zona urbana, industrial y uso agrícola), modificaron la extensión de las siguientes coberturas vegetales en la zona aledaña al Caracol (este municipal): **pastizal halófilo**, 51.3 ha **permanecieron** con ésta cobertura en el periodo completo de análisis, **augmentó** en 155.1 ha (75.15%), provenientes principalmente de: vegetación halófila hidrófila (4.9 ha), zonas sin vegetación (126.5 ha), y pastizal inducido (23.7 ha), además **perdió** 723.6 ha que pasaron principalmente a: zona urbana (568.6 ha), industrial (11.7 ha), agricultura de riego (26.7 ha), agricultura de temporal (52 ha), vegetación halófila hidrófila (18.2 ha), zonas sin vegetación (18.1 ha), vegetación urbana (11.5 ha), y pastizal inducido (17 ha), *ver cuadro 15*; **Vegetación halófila hidrófila** (9.3 ha **permanecieron** con el mismo uso), **augmentó** en 76 ha (89.10%), provenientes en su mayoría de: pastizal halófilo (18.2 ha), agricultura de riego (1.8 ha), agricultura de temporal (47.8 ha) y zonas sin vegetación (8.2 ha), además **perdió**: 192.4 ha que pasaron a: zona urbana (160.6 ha), industrial (2.5 ha),

pastizal halófilo (4.9 ha), agricultura de riego (5.1 ha), agricultura de temporal (19 ha), y zonas sin vegetación (0.3 ha), *ver cuadro 15*; éstas **zonas sin vegetación permanecieron** en 369.5 ha, **aumentaron** 125.9 ha (25.41%), en la zona urbana (45.6 ha) e industrial (23.8 ha), y en dónde antes había: pastizal halófilo (18.1 ha), corriente de agua (14.2 ha), agricultura de riego (2.6 ha), agricultura de temporal (9.1 ha), vegetación halófila hidrófila (0.3 ha), vegetación urbana (8 ha), pastizal inducido (1.7 ha), uso forestal (2.4 ha) y matorral (0.1 ha); se redujeron o **perdieron** 406.7 ha: 119.8 ha que pasaron de ser suelo desnudo a zona urbana, 12.5 ha que pasaron al uso industrial, respecto a los tipos de vegetación se recuperaron: 126.5 ha de pastizal halófilo, 34.7 ha de agricultura de riego, 29.8 ha de agricultura de temporal, 8.2 ha de vegetación halófila hidrófila, 4 ha de vegetación urbana, y 4.2 de pastizal inducido, *ver cuadro 15*. Por su parte, las **corrientes de agua** o hidrología, tuvieron ciertas fluctuaciones por la resolución temporal de las imágenes y por los errores de clasificación al categorizar cuerpos de agua turbios, poco profundos o con algas, como ya se mencionó en la sección anterior (Macedo *et al.*, 2010), por lo que las transiciones que muestra *el cuadro 15* para ésta categoría no son posibles espacialmente.

Por otra parte, al Oeste del municipio, en la Sierra de Guadalupe, se observó una reducción de la cobertura **forestal** en las partes altas de la misma. Esta cobertura **permaneció** en 83.3 ha, **incrementó** en 363.4 ha, las cuales provenían principalmente de: pastizal inducido (102.25 ha) y matorral (260.9 ha), además **perdió** 747.1 ha, las cuales pasaron a zona urbana (44.7 ha), industrial (4.8 ha), zonas sin vegetación (2.4 ha), pastizal inducido (134.6 ha), y matorral (560.6 ha), *ver cuadro 15 y figura 32*.

A las faldas de la sierra predomina el **pastizal inducido**, éste **permaneció** en 77.3 ha, **aumentó** en 392 ha, que provenían principalmente de zona urbana (17.4 ha), industrial (3.4 ha), pastizal halófilo (17 ha), agricultura de riego (26.5 ha), agricultura de temporal (70.7 ha), zonas sin vegetación (4.2 ha), vegetación urbana (111.3 ha), uso forestal (134.6 ha) y matorral (6.9 ha). Y **perdió** 492.6 ha, las cuales pasaron a zona urbana (202.7 ha), industrial (4.2 ha), pastizal halófilo (23.7 ha), agricultura de riego (18.4 ha), agricultura de temporal (34.4 ha), zonas sin vegetación (1.7 ha), vegetación urbana (13.2 ha), uso forestal (102.5 ha) y matorral (560.6 ha), *ver cuadro 15 y figura 32*.

Cuadro 15. Matriz de transición (1996-2016)

USO / COBER-TURA	ZU	-	PH	CA	AR	AT	VHH	SV	VU	PI	F	M	TOTAL 2016	PÉRDIDA S	%
ZU	7998.7	355.3			126.8	167.1		45.6	60.6	17.4			8771.5	772.8	8.81
I	132.4	76.4			12.9	23		23.8	3.2	3.4			275.1	198.7	72.23
PH	568.6	11.7	51.3		26.7	52	18.2	18.1	11.5	17			775.1	723.8	93.38
CA	55.1	4.9		10				14.2					84.2	74.2	88.12
AR	852.5	9.8			305.8	16.1	1.8	2.6	7	26.5			1222.1	916.3	74.98
AT	1209.4	21.7			90.5	304.4	47.8	9.1	15.3	70.7			1768.9	1160.1	65.58
VHH	160.6	2.5	4.9		5.1	19	9.3	0.3					201.7	192.4	95.39
SV	119.8	12.5	126.5		34.7	29.8	8.2	369.5	4	4.2			709.2	339.7	47.90
VU	317.6	11.8			45.4	58.8		8	51.6	111.3			604.5	552.9	91.46
PI	202.7	4.2	23.7		18.4	34.4		1.7	13.2	77.3	102.5	91.8	569.9	492.6	86.44
F	44.7	4.8						2.4		134.6	83.3	560.6	830.4	747.1	89.97
M	10.5	4						0.1		6.9	260.9	217.3	499.7	282.4	56.51
TOTAL 1996	11672.6	519.6	206.4	10	666.3	704.6	85.3	495.4	166.4	469.3	446.7	869.7	9554.9		
GANANCIAS	3673.9	443.2	155.1	0	360.5	400.2	76	125.9	114.8	392	363.4	652.4			
%	31.47	85.30	75.15	0.00	54.10	56.80	89.10	25.41	68.99	83.53	81.35	75.01			

Nomenclatura de clases: ZU= zona urbana; I=industrial; PH= pastizal halófilo; CA= cuerpo de agua; AR= agricultura de riego; AT=agricultura de temporal; VHH= vegetación halófila hidrófila; SV= zonas sin vegetación aparente; VU= vegetación urbana; PI= pastizal inducido; FOR= forestal y MAT= matorral

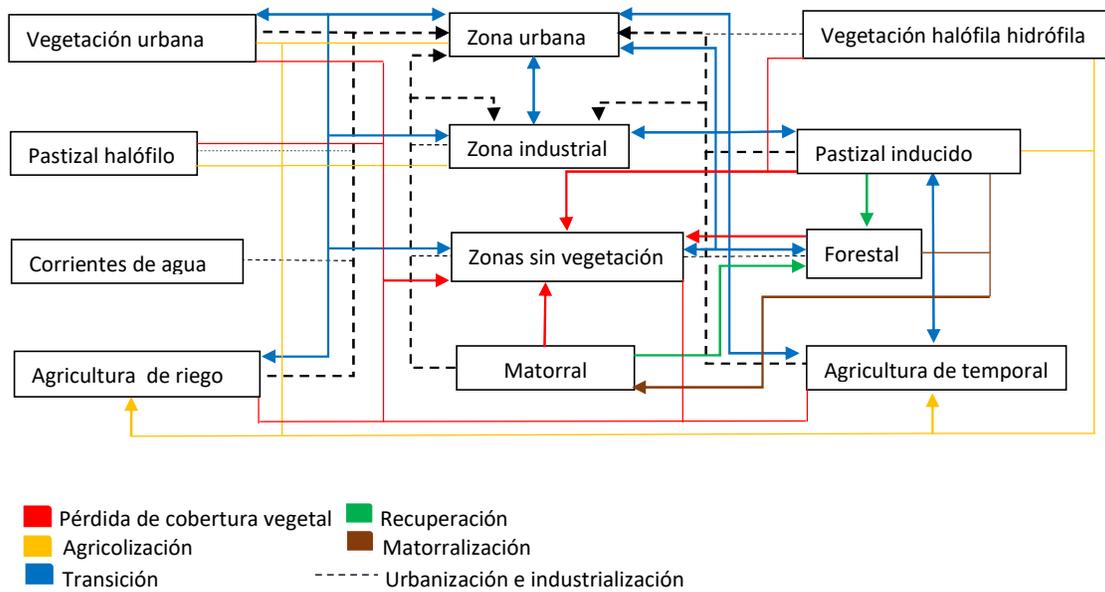


Fig. 32. Principales cambios de uso de suelo y vegetación en el período completo de análisis: 1996 a 2016

Durante las tres temporalidades de análisis, fue notable un incremento de la zona urbana e industrial en prácticamente todo el municipio, por otra parte, en la Sierra de Guadalupe (al Oeste) se observó el crecimiento en la superficie que ocupó el matorral a consecuencia de la deforestación. En la figura 33, se muestra la relación porcentual entre las superficies en hectáreas que ocupó cada uso de suelo y vegetación en 1996, 2007 y 2016.

8.3.4 Discusión de la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación en el periodo completo de análisis, de 1996 a 2016

Los principales procesos de cambio de uso de suelo identificados a lo largo del periodo completo de estudio (1996-2016) fueron: **urbanización e industrialización**, lo anterior como resultado de la explosión demográfica y la transición de la población de actividades económicas primarias (agricultura y pastoreo) hacia actividades económicas secundarias (industria manufacturera); **agricolización**, que supone un ligero aumento del uso agrícola del suelo, de 1996 a 2007, para un posterior declive en este uso de 2007 a 2016; **pérdida de coberturas vegetales**, que se observa principalmente como deforestación en la Sierra de Guadalupe, reducción del uso agrícola, vegetación halófila hidrófila, pastizal halófilo, y vegetación urbana; **matorralización**, observable principalmente como consecuencia de la *deforestación* de la Sierra de Guadalupe, como proceso natural de sucesión y colonización vegetal por plantas arbustivas características del matorral; **recuperación**, que corresponde al proceso de sucesión vegetal completo, desde gramíneas, arbustos, hasta la recuperación de la cobertura forestal, o de cualquier otro tipo de vegetación (reaparición de vegetación urbana, pastizal, vegetación halófila hidrófila y pastizal halófilo en zonas que estaban catalogadas con suelo desnudo), y **transiciones** entre coberturas, principalmente entre agricultura de riego y temporal, pastizal inducido, uso forestal y matorral *ver figura 32*.

La **urbanización** (ganancia de 3, 673.9 ha, en promedio 31.47%) **e industrialización** (ganancia de 443.2 ha, 85.30%) en el municipio puede deberse a diferentes factores, el primero de ellos es la transición económica de los habitantes de actividades primarias como la agricultura, la ganadería y el pastoreo, hacia actividades secundarias o industriales, ya que de acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018, la población económicamente activa (PEA) se encuentra distribuida de la siguiente manera en los sectores económicos: prestación de servicios: transporte, sector gubernamental y otros (50.30 % de la PEA), seguida por el comercio (24.77 %), el sector secundario, minería, industria manufacturera, petrolera, eléctrica, agua, gas y construcción (22.15%), actividades no especificadas (2.48%) y tan sólo el 0.30% se dedica al sector primario (agricultura, ganadería, pesca, caza y silvicultura) (COESPO con base

a INEGI, 2015). Esto coincide con lo reportado por García en 2012 para Ciudad Juárez, quién señala que los principales factores de expansión urbana e industrial son económicos, además al ser una zona fronteriza, ésta carece de planificación urbana adecuada.

El segundo factor que puede explicar este proceso, es el aumento del número de habitantes, de acuerdo con el censo de INEGI en 2010 en el municipio había 1, 656, 107 habitantes, pero para la encuesta intercensal de 2015 ascendieron a 1, 677, 678, con una densidad poblacional de 10, 473. 22 habitantes por km², de acuerdo con la misma encuesta, el 99.93% de esos habitantes radican en zonas urbanas, mientras que sólo el 0.07 % vive en zonas rurales. La mayor densidad poblacional se concentra al norte, a la altura de la colonia El progreso y zonas aledañas, y al este en la colonia El Salado, mientras que la menor densidad poblacional se ubica al oeste en el Ejido San Pedro Xalostoc (*ver mapa 11*).

Este aumento en la población puede explicarse por altas tasas de natalidad en los residentes, y por un tercer factor, las inmigraciones, que se han intensificado después de la revolución, producto del arribo de personas de áreas rurales empobrecidas a la ciudad de México, y áreas conurbadas del Estado de México, (tal es el caso de Ecatepec, que se localiza a los márgenes de la ciudad), además la inmigración se da fundamentalmente en personas en edad reproductiva, lo que incrementa la sobrepoblación y la demanda por el uso de suelo habitacional, provocando que la mayoría del uso agrícola cambie a uso urbano, generando también deforestación en cerros y la existencia de colonias pobremente planeadas con áreas verdes escasas (Ezcurra, 1990), esto se ve reflejado en el municipio, ya que se observó una ligera **agricolización** del suelo en el primer periodo de estudio (de 1996 a 2007), la agricultura de riego aumentó en 427.4 ha (37.79%), mientras que la de temporal en 353.5 ha (31.10%), lo anterior coincide con lo reportado por Velázquez y colaboradores en el 2002 para la República Mexicana, ya que de 1976 al 2000 aumentaron las actividades económicas primarias en la población (agricultura y pastoreo), lo cual se tradujo en la ganancia de 62,668 ha de cultivos y 75,518 ha de pastizales inducidos.

Sin embargo, en el segundo periodo de análisis (2007-2016), a consecuencia de la transición al uso urbano en Ecatepec, se perdieron 916.3 ha de agricultura de riego (74.98%) y 1,160.1 ha de agricultura de temporal (65.58%). Esta reducción del uso agrícola se considera dentro de la **pérdida de cobertura vegetal**, además, al este municipal, se perdieron 723.8 ha de pastizal halófilo y 192.4 ha vegetación halófila hidrófila, lo anterior puede deberse a la construcción del fraccionamiento las Américas en 2004, en la zona aledaña al Caracol, ya que es la única área

en la que figuraba este tipo de vegetación por las características salitrosas del suelo, como parte de este crecimiento urbano no planificado adecuadamente, se perdieron 552.9 ha vegetación urbana o áreas verdes municipales.

Por otra parte, al oeste en la Sierra de Guadalupe se perdieron 492.6 ha pastizal inducido, por el incremento de asentamientos a las faldas de la misma, mientras que en las partes altas se perdieron 747.1 ha uso forestal, siendo esta **deforestación** una de las reducciones más notables, se debe principalmente a la progresiva urbanización, la tala clandestina, los incendios inducidos y el sobrepastoreo (Ayuntamiento de Ecatepec, 2016), ocasionando disminución en la biodiversidad nativa, la pérdida de uso potencial en bienes y servicios ecosistémicos, la alteración de los ciclos hidrológicos, y biogeoquímicos (Velázquez *et al.*, 2002), además contribuye a la perturbación del clima y compromete una fuente importante de captura de carbono (Pineda *et al.*, 2009).

Dado que la Sierra es uno de los principales pulmones del área metropolitana, su deforestación ha provocado mala calidad del aire, particularmente el municipio registra hasta 106 puntos IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire) (La prensa, 2017). Lo anterior se observa de manera general en el Estado de México en el que la mala calidad del aire ha ido en aumento por la tendencia a la reducción del uso forestal, esta se da en áreas próximas a la agricultura, y a su vez la reducción del uso agrícola se asocia al incremento del uso habitacional o zona urbana (Pineda *et al.*, 2009).

La tendencia hacia usos de suelo antrópicos y la disminución de cobertura vegetal, se vió reflejada en general en la República Mexicana en la segunda mitad del siglo XX, en 2002 Velázquez y colaboradores realizaron un análisis de la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación de 1976 al 2000, los principales cambios encontrados son reducción de 3,054 ha de vegetación halófila y la deforestación de 20,813 ha de bosques, posteriormente en 2009 Pineda y colaboradores reportaron la deforestación de 13,691 ha sólo en el Estado de México.

De manera particular en el municipio, se observó que la deforestación fue secundada por el aumento de la vegetación arbustiva o matorral, como parte de un proceso natural de sucesión vegetal o **matorralización**, este proceso fue observado en la zona montañosa del Parque Nacional Ordesa y Monte Perdido, por Alados y colaboradores, como resultado también de la reducción de la actividad ganadera y el pastoreo, los autores señalan que es uno de los procesos de sucesión ecológica más importantes en zonas montañosas, y en los últimos años ha aumentado como consecuencia del cambio climático, la tala de árboles y los cambios en el

uso de suelo, este proceso altera el funcionamiento, la estructura y la productividad ambiental de los ecosistemas (Dullinger *et al.*, 2003; Briggs *et al.*, 2005 en Alados *et al.*, 2011). La matorralización constituye un proceso paulatino de **recuperación** en la vegetación, en el periodo completo de análisis se observó el restablecimiento de uso forestal en 363.4 ha, por otra parte, las principales **transiciones** se observaron entre agricultura de riego, temporal y pastizal, esto puede explicarse por la rotación de cultivos, cuyo objetivo es maximizar la productividad de la tierra intercambiando periódicamente el tipo de cultivos en un mismo terreno, aumentando los nutrientes en el suelo y previniendo plagas (Altieri *et al.*, 1999).

En conjunto, el incremento en los usos antrópicos y la pérdida de cobertura vegetal contribuyen a la degradación del suelo, proceso que disminuye cualitativa y cuantitativamente su capacidad de producir bienes y servicios ambientales, incrementa el riesgo de deslaves e inundaciones. Lo anterior incide directamente en la calidad de vida, la salud y bienestar de los habitantes (Juan *et al.*, 2006 en García *et al.*, 2012). Esto además se relaciona con la planificación urbana inadecuada, que a menudo provoca asentamientos irregulares en zonas que por sus características naturales son potencialmente inundables, tal como lo señalan Fuente y García quienes analizaron la relación del uso de suelo y el riesgo de inundación en la Cuenca del Río Nervión, zona potencialmente inundable por sus características biofísicas naturales, lo cual se ve agravado porque el diseño infraestructural del drenaje no favorece la integración del medio natural y el antrópico (Fuente y García, 2014).

8.4 Zonificación del riesgo de inundación y su relación con el uso de suelo municipal (1996, 2007 y 2016)

8.4.1 Descripción de la zonificación del riesgo

La zonificación del riesgo ambiental de inundación es la misma para 1996, 2007 y 2016 (*ver mapa 21*), aunque las superficies inundables fluctuaron ligeramente por el cambio de uso de suelo, de manera particular el riesgo alto aumentó.

Las zonas con riesgo bajo se ubican principalmente en la Sierra de Guadalupe, al noroeste en Vista Hermosa, Mesa de los Leones y Tierra Blanca, al suroeste en Cerro Gordo, y al noreste en Chiconautla, Prados de San Juan, y Vistas Ecatepec. Debido a que la pendiente pronunciada en dichas zonas genera una filtración pluvial eficiente, las rocas y el suelo poseen buena permeabilidad (rocas ígneas y leptosol con textura gruesa), hay cubierta vegetal

(principalmente uso forestal en las partes altas, matorral en las partes medias y pastizal inducido a las faldas de los cerros), la capacidad de microcuencas es alta, y a pesar de la progresiva urbanización la densidad de calles aún es baja.

En 1996 la superficie inundable con riesgo bajo abarcó 1,730.34 ha (11.02% del total municipal), debido a la presencia de coberturas vegetales, principalmente uso forestal, *ver mapa 22*, para 2007 ésta superficie disminuyó a 1,655.09 ha (10.60%), *ver mapa 23*, a consecuencia de la pérdida de vegetación en general, y por la deforestación, que conlleva a un proceso de sucesión vegetal o matorralización que se observó de 2007 a 2016, provocando un ligero aumento en ésta categoría a 1,694.80 ha (10.80%). Por lo que en el período completo de análisis la superficie en riesgo bajo decreció 35.54 ha a consecuencia del aumento gradual de usos antrópicos del suelo (urbano y agrícola principalmente), *ver mapa 24*.

Por otra parte, el riesgo medio se localiza al oeste en colonias como: Ejido San Pedro Xalostoc y La agüita, a las faldas de la Sierra de Guadalupe, al este en la zona aledaña al Caracol, en colonias como Jose Antonio Torres, Josefa Ortiz de Domínguez, Alfredo del Mazo, Alfredo Torres Martínez, El dique, Potrero chico, Valle de Ecatepec, El chamizalito, El fraccionamiento las Américas, La Sosa Texcoco, y El Salado, al noreste en Las Brisas y al centro municipal en Ejido Tulpetlac, Santa María Tulpetlac, Nuevo Laredo, y Ecatepec de las fuentes. Estas áreas poseen rocas sedimentarias y suelo del tipo feozem con permeabilidad media, zonas agrícolas, pastizal inducido, y manchones de vegetación halófila (por la gran cantidad de sales), pendiente suave, la distancia a hidrología está entre 1 y 2 km y la capacidad hídrica de microcuencas abarca entre 1,000 y 2,000 ha. Climáticamente se registran precipitaciones de entre 590 y 600 mm anuales y una evaporación alta: 1600-1700 mm, ya que es una zona con pendiente baja, el sol incide de manera directa en el suelo y la vegetación compuesta por gramíneas y cultivos guarda poca humedad.

En 1996 la superficie inundable en riesgo medio de inundación abarcó 5,974.65 ha (38.04% del territorio municipal), debido a la presencia de uso agrícola (18.44% del territorio), pastizal inducido (3.39%) y vegetación urbana (4.90%), *ver mapa 22*, para 2007 ésta superficie incrementó a 6,017.13 ha (38.32%), *ver mapa 23*, para 2016 el riesgo medio ocupó (37.97%), se redujo en 59.53 hectáreas de manera proporcional con la disminución de éstas coberturas, ya que el uso agrícola se redujo a 8.48%, el pastizal inducido a 2.72% y la vegetación urbana a 1%. Lo anterior se debe a la urbanización, que puede explicarse por el aumento en la densidad poblacional y la transición económica de actividades primarias (agricultura y pastoreo) hacia

actividades del sector secundario o industrial. Por lo que en el período completo de análisis el riesgo medio disminuyó 17.05 ha, *ver mapa 24*.

Las partes más vulnerables del territorio (en riesgo alto y muy alto de inundación) se localizan en la zona urbana, el riesgo alto se distribuye en la mayor parte del municipio, al noroeste en colonias como Luis Donald Colossio, y residencial Coacalco; al noreste en Jardines de Morelos; al centro y sur municipal en colonias como: Industrial Cerro Gordo, Jardines de Casa Nueva, Jardines de Santa Clara, Ciudad Azteca, Río de Luz, San Agustín, Miguel Hidalgo, Santa Clara, Xalostoc, Tablas del Pozo, Hank González, y Sauces Coalición, y más al sur casi colindando con Nezahuacóyotl en colonias aledañas al río de los remedios: Villa de Guadalupe Xalostoc, Granjas Valle de Guadalupe, El chamizalito, Valle de Aragón, Nicolás Bravo, Media luna, y Emiliano Zapata. Por su parte el riesgo muy alto se ubica al sur en Central Michoacana, Fuentes de Aragón, Nueva Aragón, Poesía mexicana, Altavilla, Las Vegas y San José Xalostoc, *ver mapa 21*.

Lo anterior se debe a que en éstas zonas hay alta densidad de calles, yacen sobre rocas de origen aluvial y lacustre de textura fina, con suelo anegable (solonchak), lo que además de incrementar el riesgo por inundación, promueve el hundimiento periódico del territorio, ésta zona urbana posee pendientes suaves (máximo 15° de inclinación), hay poca cubierta vegetal, y la hidrología se encuentra a 1 km o menos de distancia de las construcciones (tal es el caso de las colonias aledañas al canal Las sales y el río de Los Remedios, al sur del municipio), debido al tipo de relieve la capacidad hídrica de las microcuencas en la zona es baja (menos de 1000 ha). La precipitación en ésta zona oscila entre los 553-590 mm y la evaporación es alta 1700 -1900 mm, debido a que es una zona de pendiente suave con poca cubierta vegetal.

En 1996 el riesgo alto de inundación abarcó 7,901.01 ha (50.30%), en 2007 abarcó 7,919.73 (50.44%) y en 2016 abarcó 7,939.62 ha (50.60%), mientras que el riesgo muy alto se mantuvo constante, lo anterior como resultado del crecimiento de la zona urbana e industrial del 53% del total territorial en 1996 al 69.74% en 2016. Lo anterior produce deforestación y a consecuencia de ésta arrastre de sedimentos por la precipitación, reducción del cauce natural de los ríos y su capacidad hídrica, contribuyendo a incrementar el riesgo en calles aledañas a ésta como la avenida Insurgentes y colonias cercanas al parque ecológico ehécatl, *ver mapas 22,23 y 24*. En la *figura 33* se muestra una comparación de la superficie inundable para cada categoría de riesgo en los tres años de análisis, los cambios en las superficies inundables no fueron significativos:

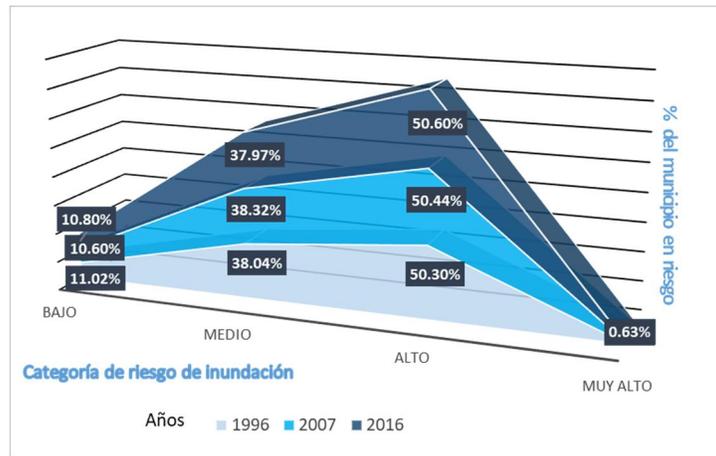


Fig. 33. Comparación de superficies inundables en Ecatepec en 1996, 2007 y 2016 (riesgo bajo, medio, alto y muy alto de inundación)

Por otra parte, socialmente las áreas más vulnerables o menos resilientes en el municipio de acuerdo con los indicadores empleados para estimar la resiliencia de la población, se ubican en la zona aledaña a la Sierra de Guadalupe, ligeramente al centro del municipio, a la altura de colonias como: viveros de Tulpetlac, área nueva, La Presa, El parque, Tecuexcomac, Plan de Ayala, Texalpa, Tlatempa, Santa María Tulpetlac, Industrial Cerro Gordo y Nuevo Laredo, en dónde el riesgo de inundación es medio y alto, *ver mapa 25*.

8.4.2 Discusión

El aumento de la zona urbana e industrial es un factor determinante para el incremento del riesgo de inundación en el municipio, ya que provoca una alta tasa de generación de residuos, cuyo manejo inadecuado calapsa el drenaje, afectando los núcleos urbanos que se ubican a poca distancia de canales e hidrología. Por otra parte, esta transición sin planificación territorial hacia el uso urbano e industrial del suelo redujo otros usos como el agrícola y provocó pérdida de la cobertura vegetal en general, la ausencia de vegetación merma la captación e infiltración de agua pluvial por el suelo, cuya permeabilidad es ya de por sí deficiente al ser de origen lacustre en la mayor parte del territorio (textura fina, arcillosa o arenosa), esta naturaleza lacustre también provoca hundimientos que dañan el drenaje.

Aunado al riesgo ambiental, es importante tomar en cuenta que la población inmersa es vulnerable económicamente y poco resiliente ante pérdidas o enfermedades generadas por una inundación, lo anterior coincide con otro estudio de caso del riesgo de inundación en la zona urbana de Toluca, realizado por Baruch y Mendoza en 2012, aunque el área no pertenece a la Cuenca del Valle del México, forma parte de la cuenca Lerma-Santiago, y posee características

biofísicas similares al municipio, los autores señalan que debido a la extracción de agua de los acuíferos para abastecer la Ciudad de México durante los últimos 50 años se han presentado hundimientos, lo cual en conjunto con la presencia de sedimentos lacustres blandos, pérdida de vegetación, urbanización y socioeconomía baja, agrava la problemática de inundación, sus resultados muestran que el 52.41% del territorio se encuentra en riesgo alto, el 33.88% está en riesgo medio y el 13.71% en riesgo bajo, de manera análoga en Ecatepec (2016) el 50.60% del territorio se encuentra en riesgo alto, distribuido en la zona urbana (sobre a todo al sur en colonias como San Agustín, San José Xalostoc, Las Vegas o el Chamizal), el 37.97% en riesgo medio, que se distribuye al centro y al este municipal (en las Américas) y el 10.80% en bajo, situado en las zonas con pendientes pronunciadas, al oeste en la Sierra de Guadalupe y al noreste en Chiconautla.

Además de incrementar el riesgo de inundación, la urbanización es un factor de presión que genera la necesidad de contar con áreas para uso habitacional, llevando a la población a asentarse en zonas que no son aptas, a menudo por la accesibilidad en los costos (DOF, 1993 en Mendoza y Orozco, 2014). El coste económico no siempre es bajo en viviendas ubicadas en zonas de riesgo, tomando como ejemplo el pasado terremoto del 19 de septiembre, cuyas principales afectaciones se dieron en zonas residenciales, a consecuencia de la concesión de permisos para construir edificios de alta envergadura en zonas donde el suelo no está apto para soportarlas (zona lacustre), y con materiales y cimientos no adecuados para una zona de alta sismicidad, lo cual evidencia la corrupción en la que está inmersa la prestación del servicio de vivienda, provocando severas consecuencias: pérdidas humanas y materiales.

Sin embargo, la mayoría de las veces, los habitantes de menos recursos ocupan los peores sitios debido a su bajo coste económico, estableciéndose en laderas inestables y zonas potencialmente inundables (Mendoza y Orozco, 2014), como resultado de que las inmobiliarias no respetan el Atlas Nacional de Riesgos para construir, lo anterior se ve reflejado en el municipio, ya que gran parte de la población habita en zonas de riesgo, ya sea en los cerros, exponiéndose a deslaves o en zonas aledañas a los canales, incrementando la posibilidad de que se vean afectados por una inundación.

Otro ejemplo de ubicación inadecuada del uso habitacional es el fraccionamiento las Américas construido por casas Ara, éste yace sobre la exfábrica sosa Texcoco (al este), y debido al alto contenido de salitre en el suelo las viviendas se han visto afectadas, además se han gestado problemas sanitarios en la población (La Jornada, 2004), en ésta zona el riesgo de inundación

se considera medio de acuerdo con la aplicación del modelo, debido a las características biofísicas contempladas, sin embargo al ubicarse justo encima del antiguo lago de Texcoco es una zona muy vulnerable a inundación en la realidad.

Debido a que éstas decisiones inadecuadas en planificación urbana afectan directamente a la población, es preciso contextualizar también los riesgos en un territorio en función de ésta. De manera particular las inundaciones representan pérdidas humanas, económicas, daños a la infraestructura urbana, el comercio y la agricultura local (Jordán, 2016), dicho lo anterior, la incorporación de aspectos socioeconómicos y demográficos en la evaluación de riesgos es crucial para valorar la capacidad de resiliencia de la población ante los perjuicios ocasionados por un desastre, ésta resiliencia dependerá en gran medida de su poder adquisitivo, particularmente de acuerdo con los indicadores socioecómicos contemplados la población más vulnerable de Ecatepec se ubica al centro municipal en colonias como viveros de Tulpetlac, área nueva, La Presa, El parque, Tecuexcomac, Plan de Ayala, Texalpa, Tlatempa, Santa María Tulpetlac, Industrial Cerro Gordo y Nuevo Laredo, en dónde el riesgo de inundación va de medio a alto, *ver mapa 25*.

Partiendo de la importancia de las pérdidas materiales ante inundación, Díaz y colaboradores en 2011, realizaron la estimación de costos directos provocados por inundación en Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, estimando un costo probable de 33.95 millones de pesos, por lo que en Ecatepec el costo podría incrementar ya que el municipio posee mayor extensión territorial y densidad poblacional, esto es alarmante ya que la mayor parte de la población tiene grado de marginación alta.

En el Estado de México, la instancia gubernamental encargada de prevenir las inundaciones y mitigar dichas pérdidas es el municipio, con el Sistema Nacional de Protección Civil SINAPROC, sin embargo la intervención de éste ante inundación es escasa, en 2011 Toscana y colaboradores evaluaron la percepción que tenía la población de San Mateo Atenco acerca de Protección Civil, evidenciando que aunque más de la mitad de los habitantes saben de la existencia de éste organismo, sólo un 17% se ha enterado de pláticas o simulacros para prevenir inundaciones locales, por lo que el 80% informó que su actuación ante el desastre se basa en el empirismo, ya que nunca han recibido instrucciones por parte de las autoridades, además denuncian que la ayuda monetaria por parte del municipio para mitigar pérdidas materiales por inundación es inequitativa o insuficiente, lo anterior se vió reflejado también en Ecatepec en las pasadas inundaciones de Agosto y Septiembre, causadas por el copalco de un

muro del lado izquierdo del Gran Canal, de acuerdo con el informe municipal se entregó una ayuda monetaria de 8,000 pesos a los damnificados, quienes denunciaron que en algunas colonias se limitaron a entregarles un Kit de limpieza, las zonas más afectadas por el siniestro fueron San José Xalostoc, Las Vegas Xalostoc, Altavilla y Villas de Guadalupe, al sur del municipio (Diario de Yucatán, 2017), las cuales se encuentran en riesgo alto de inundación. Además de la prevención y mitigación de desastres, el gobierno municipal tiene a su cargo la planificación territorial, urbana, y la prestación de servicios públicos: alumbrado, alcantarillado, drenaje, disposición de aguas residuales y abastecimiento de agua potable (Ziccardi, 2003; Merino, 2007 en Toscana *et al.*, 2010).

En Ecatepec el 92.10% de las viviendas cuentan con sistema de alcantarillado y drenaje, las áreas que carecen de éste servicio se ubican en las partes altas de la Sierra de Guadalupe y en colonias incipientes. A pesar de esto, las inundaciones son frecuentes en el municipio, ya que el funcionamiento del drenaje no es el óptimo, debido a que las tuberías son antiguas, el hundimiento periódico del suelo y las contrapendientes contribuyen a fracturarlas y el manejo inadecuado de residuos sólidos urbanos a colapsarlas (Ayuntamiento de Ecatepec de Morelos, 2016). Durante la actual administración del Partido Revolucionario Institucional (PRI) en el municipio se han pronunciado compromisos para mitigar la problemática de las inundaciones, sin embargo (a pesar de la puesta en marcha de obras públicas en el sistema de tuberías) no se han visto los resultados esperados.

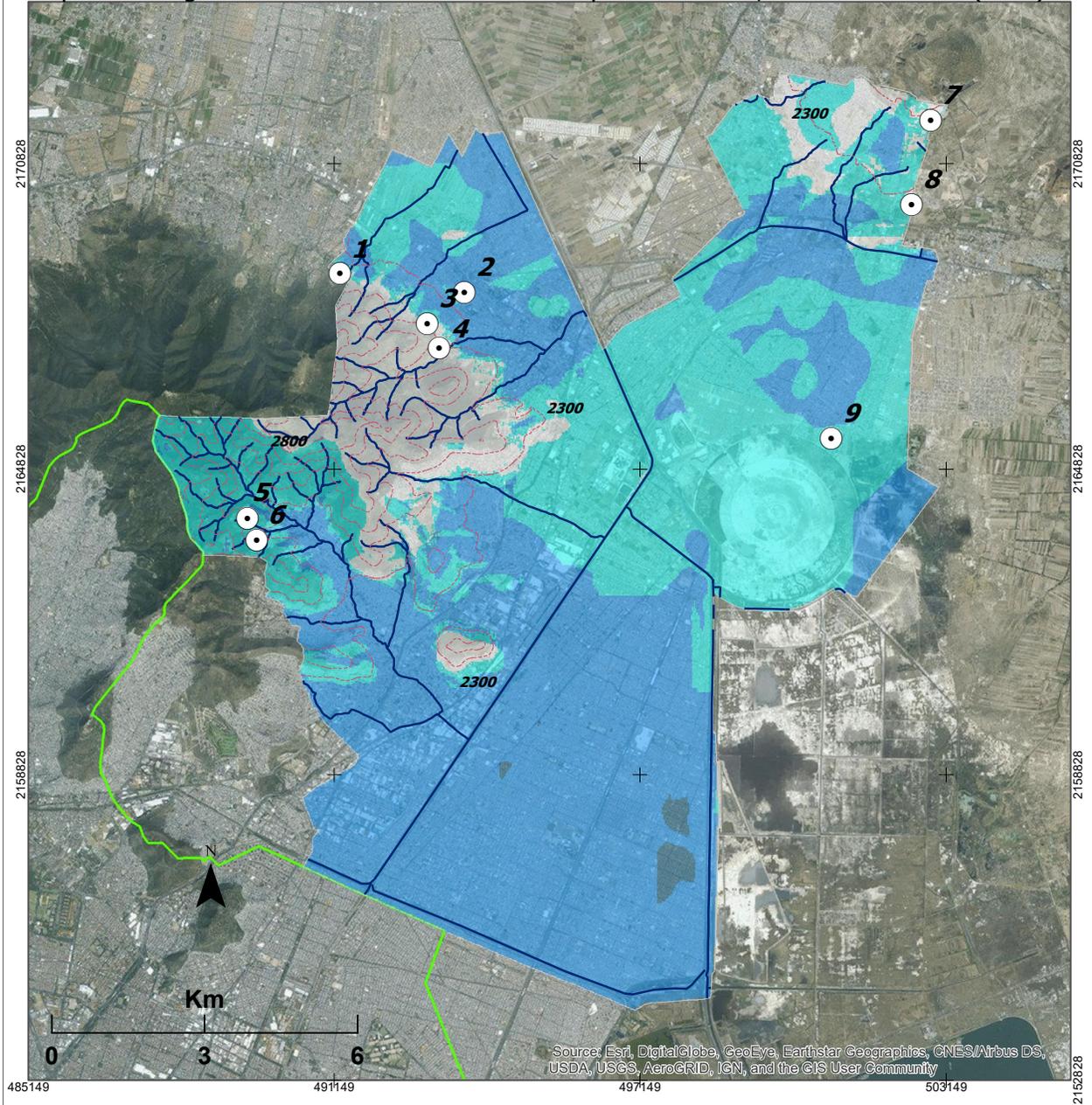
Una prueba de esto, es el colector de aguas pluviales en la avenida Santa Teresa, colonia San Agustín, que está causando graves daños en las viviendas aledañas, hundimiento del terreno, desgaste del suelo, escases en el suministro agua (a cargo del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec- SAPASE) y pérdidas económicas por cierre de negocios. Ésta obra hidráulica de drenaje profundo (18 metros-m) está a cargo de la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM) y de la empresa COVASA S.A de C.V. De acuerdo con expertos de Instituto Politécnico Nacional (IPN) el problema radica en que las lumbreras (dónde se introduce la tubería) abarcan el ancho de la avenida (14 m) y que las características del suelo no son adecuadas para el tipo de tubería y el diámetro de la misma (alto grado de hundimientos y sismicidad), existen obras similares en la avenida Lourdes (misma colonia) y en la colonia Río de Luz, las cuales forman parte del programa de saneamiento y obras de drenaje del Estado de México, cuya proyección final es para el año 2030 y están relacionadas con otros megaproyectos como la construcción del nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (García y Anguiano, 2015).

La distribución espacial de los colectores está estrechamente relacionada con el riesgo de inundación, ya que estos se encargan de drenar áreas expuestas al escurrimiento y captar grandes volúmenes de agua, esto se vio reflejado en la evaluación de dicho riesgo en Iztapalapa (la delegación más poblada del país, secundada por Ecatepec), realizada por Vera y López en 2010, en donde se evidenció que las zonas urbanas cercanas a los colectores son las más propensas a inundación, además de que son aquellas que presentan mayor hundimiento o subsidencia del suelo debido a que al igual que en Ecatepec, yacen sobre estratigrafía lacustre, además los autores destacan como principales causas de inundación en la zona la distribución heterogénea de lluvia, baja capacidad de drenaje y vertido de desechos en vía pública que obstruyen el drenaje, cuyo propósito ideal es disminuir el riesgo de inundación al máximo en zonas urbanas, por lo que los ríos son intubados para que las aguas residuales no dañen a la población, sin embargo debido a problemas de infraestructura, el crecimiento demográfico y la creciente demanda por el uso del mismo, las inundaciones han incrementado.

Esta intubación de los ríos altera el comportamiento del agua con respecto al medio natural, en el que la lluvia es filtrada por medio del suelo, rocas y vegetación hasta escurrir en valles y canales, mientras que en la urbe el suelo es impermeabilizado por el asfalto, la precipitación contribuye al arrastre de sedimentos, rocas y/o basura, incrementando la carga del drenaje artificial. Siendo la basura una de las principales fuentes de inundación en lugares como Ecatepec, en el que la problemática del manejo de residuos se debe principalmente a que, por una parte el sistema de recolección no contempla la separación y tratamiento adecuado de los mismos y por otra, la población tiende a arrojar sus desechos en la vía pública en vertederos clandestinos a cielo abierto. El municipio forma parte de la cuenca de México, la cual depende por completo del alcantarillado para evitar las inundaciones, en el corren el Gran Canal, el Río de los Remedios y el Canal Las Sales (*ver mapa 6*), los cuales además reciben descargas de aguas residuales de toda el área metropolitana (Reinoso *et al.*, 2012). Espacialmente esto se relaciona con la zonificación del riesgo de inundación ya que las inundaciones en Ecatepec son de origen fluvial, es decir por desbordamiento de estos canales por lo que las zonas en riesgo alto y muy alto se ubican cerca de la avenida Gran Canal y al sur del municipio en colonias aledañas al río de Los Remedios: Altavilla, San José Xalostoc, Las Vegas, El Chamizal, Valle de Aragón, San Agustín, Jardines de Santa Clara, por mencionar algunas.

Anexo cartográfico 5. Riesgo de inundación

Mapa 21. Riesgo ambiental de inundación en Ecatepec de Morelos, Estado de México (2016).



Zonificación del riesgo de inundación

- bajo
- medio
- alto
- muy alto

Elementos base

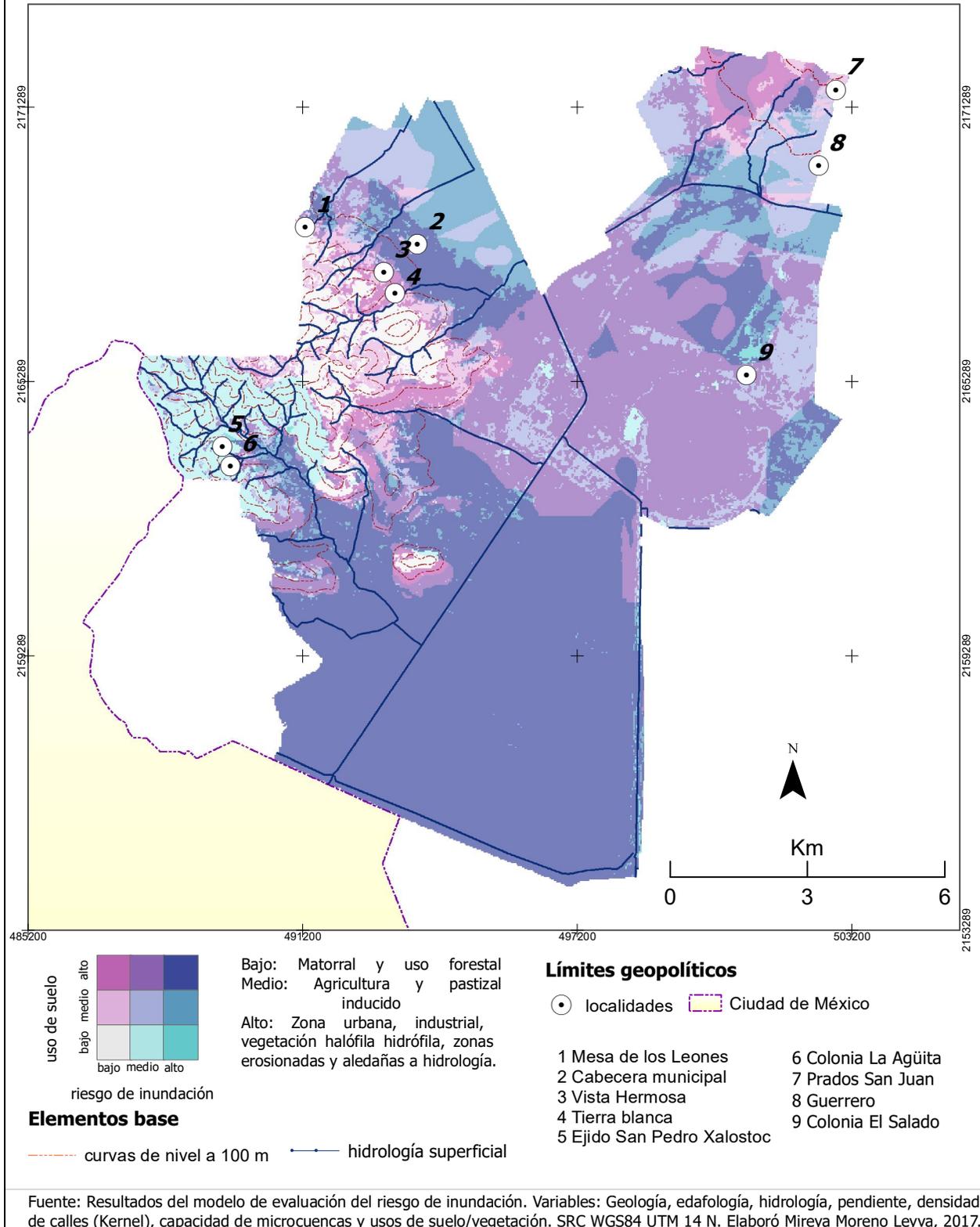
- curvas de nivel a 100 m
- hidrología superficial

Límites geopolíticos

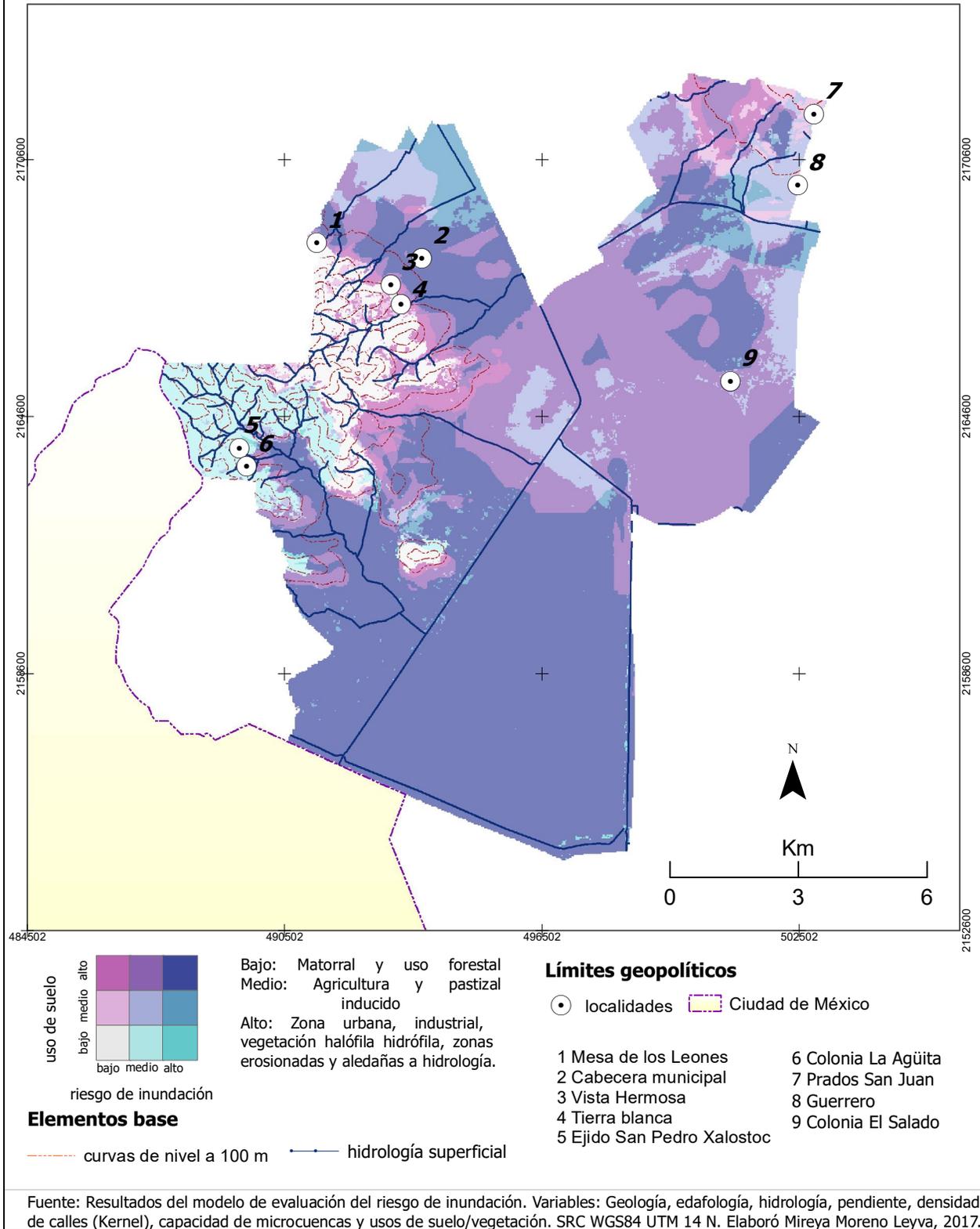
- localidades
 - Ciudad de México
- | | |
|----------------------------|---------------------|
| 1 Mesa de los Leones | 6 Colonia La Agüita |
| 2 Cabecera municipal | 7 Prados San Juan |
| 3 Vista Hermosa | 8 Guerrero |
| 4 Tierra blanca | 9 Colonia El Salado |
| 5 Ejido San Pedro Xalostoc | |

Fuente: Resultados de evaluación del riesgo de inundación. Variables: Geología, edafología, hidrología, pendiente, densidad de calles, microcuencas y clasificación de usos de suelo/vegetación(2016). SRC WGS84 UTM 14 N. Elaboró Mireya Moreno Leyva, 2017.

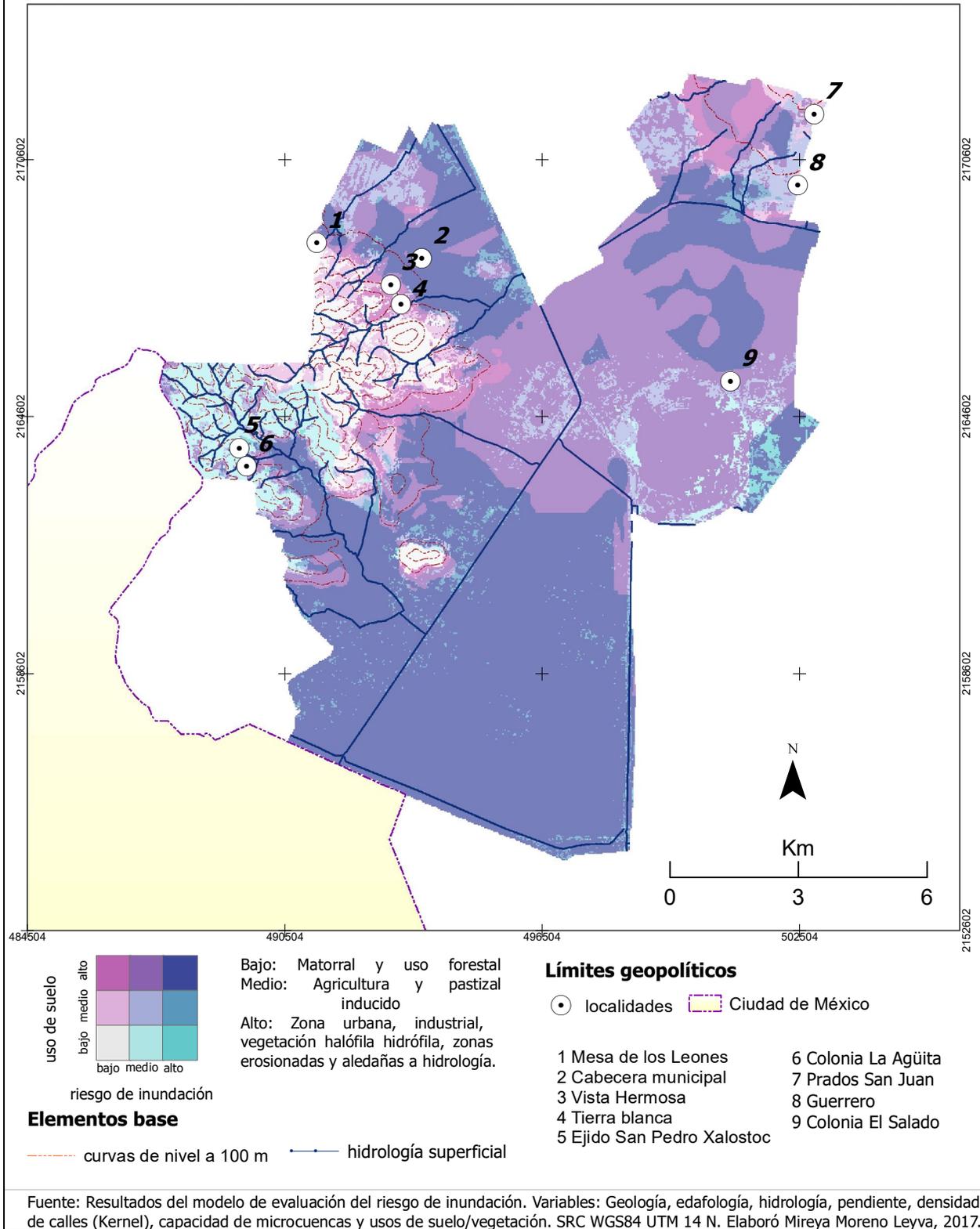
Mapa 22. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación en Ecatepec (1996)



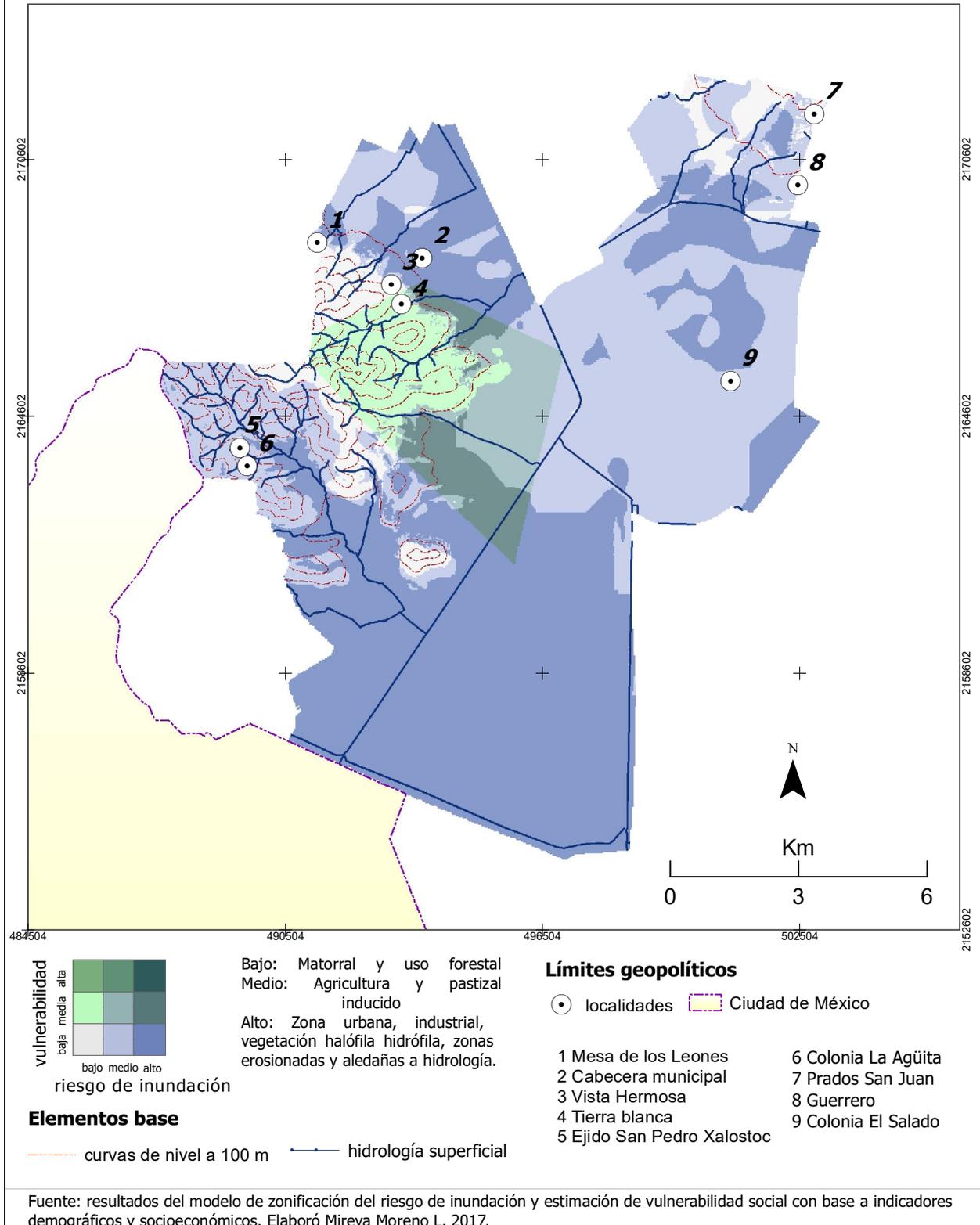
Mapa 23. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación en Ecatepec (2007)



Mapa 24. Relación espacial entre el uso de suelo y el riesgo de inundación en Ecatepec (2016)



Mapa 25. Relación espacial entre el riesgo de inundación y la vulnerabilidad social en Ecatepec



8.5 Descripción y discusión de la identificación de zonas con vertederos clandestinos a cielo abierto y su relación espacial con el riesgo de inundación

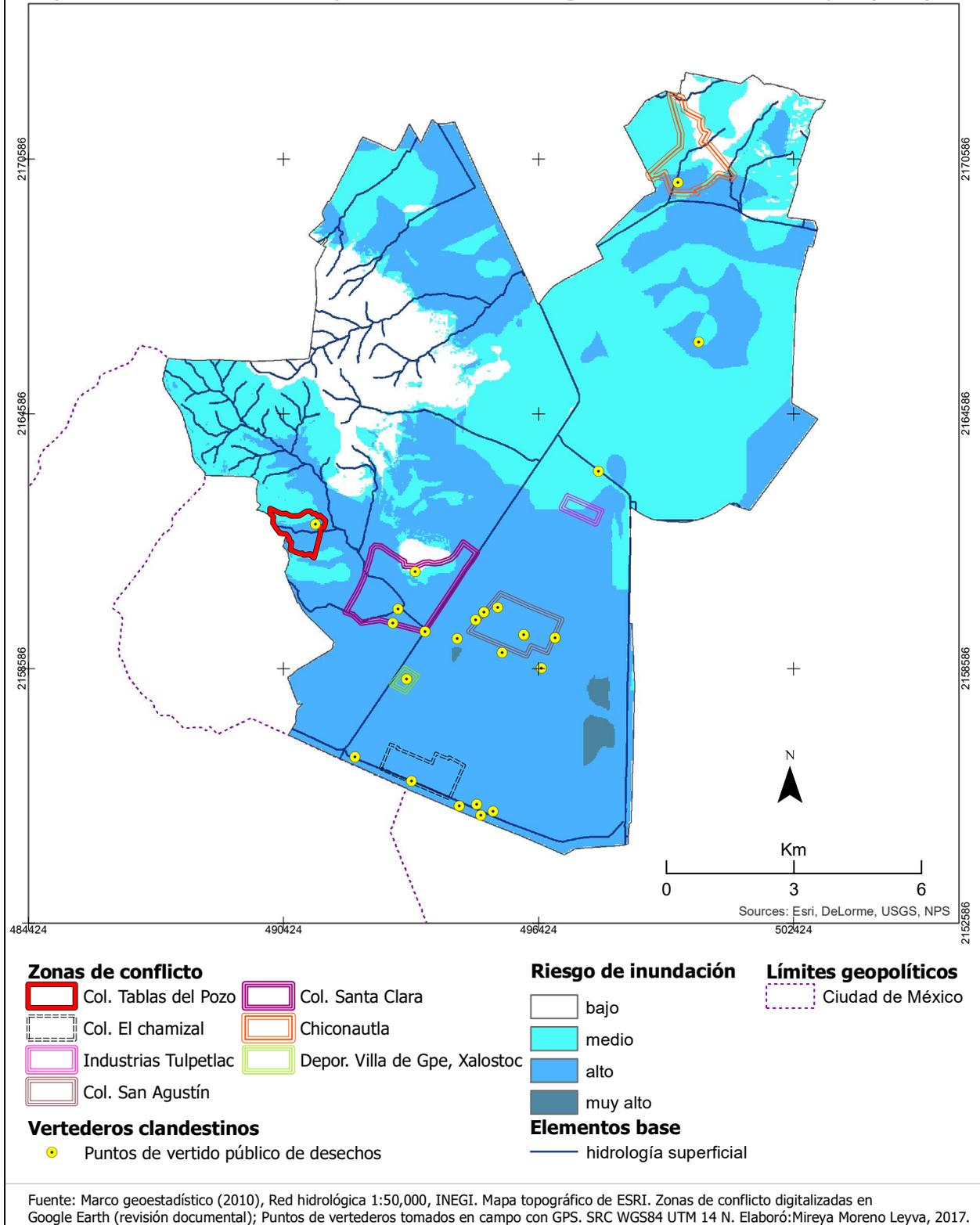
Las zonas conflictivas por vertido de desechos en vía pública, su distribución y relación espacial con el riesgo de inundación, se muestran en el *mapa 26*, al noreste Chiconautla, en riesgo medio y alto, al este en el área aledaña al Caracol la colonia Industrias Tulpetlac, predominantemente en riesgo alto, al oeste a las faldas de la Sierra de Guadalupe Tablas del Pozo y cerca del Cerro Gordo la colonia Santa Clara, en riesgo alto, ligeramente al sur San Agustín, en riesgo alto, y al sur aledaña al Río de Los Remedios El Chamizal, en riesgo alto de inundación.

Lo anterior muestra que el vertido de desechos sólidos urbanos en la vía pública es un factor que incrementa el riesgo de inundación en Ecatepec, de acuerdo con la Secretaría de Manejo de los Recursos Naturales SEMARNAT, para el año 2012 el promedio de generación de residuos sólidos urbanos *pér capita* era de 0.99 (kg/habitante/día), lo cual equivale a 1, 660, 901.22 kilogramos en total para la población de Ecatepec, esto con base a la información de la encuesta intercensal de INEGI en 2015. Las cifras son alarmantes, por lo que si el crecimiento poblacional no se detiene las soluciones a problemáticas socioambientales como el manejo de residuos, las inundaciones, o la prestación de servicios, como el abastecimiento de agua potable y el transporte, serán cada vez más difíciles y costosas (Domínguez, 2000).

De acuerdo con la Constitución Política del país y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGRI) el manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) le compete por completo al gobierno municipal. La NOM-083-SEMARNAT-2003, se encarga de regular los sitios de disposición final de residuos a fin de disminuir los perjuicios sociales y ambientales que una inadecuada gestión de los mismos podría causar, por lo que señala que al establecer un vertedero debe considerarse un área de amortiguamiento a núcleos urbanos, hidrología superficial, fallas geológicas (evitar inestabilidad y filtración de lixiviados), además está prohibido que estas instalaciones se construyan cerca de áreas naturales protegidas ANP, zonas especiales (arqueológicas, manglares, marismas, recarga de acuíferos etc.) y/o zonas inundables (Rodríguez y Rebollar, 2005). Lo anterior contrasta con la ubicación de vertederos clandestinos ubicados en Ecatepec, ya que están en la zona urbana (que además es potencialmente inundable), a muy poca distancia de vías de comunicación, hidrología superficial y áreas con importancia ambiental como la Sierra de Guadalupe (*Ver mapa 26*). Por lo que se hace un llamado a las autoridades pertinentes para poner atención a estas problemáticas.

Anexo cartográfico 6. Vertido público de desechos y riesgo de inundación

Mapa 26. Zonas con basureros y su relación con el riesgo de inundación en Ecatepec (2016)



9.0 Conclusiones

- Ecatepec posee características ambientales propicias para inundación por yacer en la planicie lacustre del antiguo Lago de Texcoco, además debido a la pobre planificación territorial, los núcleos habitacionales están aledaños a la hidrología superficial. Socialmente es poco resiliente por tener marginación alta, los sectores más vulnerables son personas en edad de 0 a 14 años (26.35%), población con alguna discapacidad (4.31%), población senil (5.65%) y personas sin acceso a los servicios de salud pública (40%).
- Los principales cambios de uso de suelo identificados de 1996 a 2016 fueron el aumento de 4,105.62 ha de uso urbano y 549.81 de uso industrial, la reducción de 1,574.82 ha uso agrícola, y 1,367.19 ha de coberturas vegetales (al este pastizal halófilo y vegetación hidrófila, al oeste uso forestal y pastizal inducido en la Sierra de Guadalupe, lo anterior produjo un aumento de 540.72 ha de matorral en la misma).
- La zonificación del riesgo de inundación fue la misma para 1996, 2007 y 2016, el riesgo alto y muy alto se ubica al noroeste en colonias como Luis Donald Colossio, y Parque residencial Coacalco, al noreste en Jardines de Morelos, al centro y al sur en Industrial Cerro Gordo, Jardines de Santa Clara, Ciudad Azteca, San Agustín, Xalostoc, Tablas del Pozo, El Chamizal, Las vegas y Valle de Aragón.
- La relación entre cambio de uso de suelo y riesgo de inundación no fue significativa ya que fluctuó ligeramente de 1996 a 2016, particularmente el riesgo alto incrementó en 38.61 hectáreas.
- Las colonias aledañas al Canal Las Sales, El Gran Canal, Río de Los Remedios y La Majada, son las más vulnerables a inundación y las que más vertederos clandestinos presentan, tal es el caso de Chiconautla, Industrias Tulpetlac, Tablas del Pozo, Santa Clara, San Agustín y El Chamizal. Al ser vertederos clandestinos no planeados violan por completo la norma mexicana para la disposición final de residuos NOM-083-SEMARNAT-2003, ya que yacen en la zona urbana (que además es potencialmente inundable), aledaños a canales y áreas con importancia ambiental como la Sierra de Guadalupe.

10.0 Consideraciones finales

El presente documento expone una propuesta espacial para zonificar el riesgo de inundación contemplando variables ambientales y sociales, apegándose al contexto territorial de Ecatepec, aunque con limitaciones de escala cartográfica, por lo que sería útil incorporar información más específica y estimar la vulnerabilidad social con una metodología adecuada como el trabajo en campo o la aplicación de encuestas, disminuyendo así la generalización.

Se espera que los resultados obtenidos sirvan a las autoridades pertinentes para dar solución a la problemática de inundación y vertido público de desechos en el municipio, favoreciendo la toma de decisiones.

Algunas recomendaciones:

- Realizar un análisis de aptitud territorial, para implementar una adecuada planificación urbana, reduciendo la presencia de asentamientos irregulares en laderas de cerros o aledaños a canales, los cuales ponen en riesgo a la población.
- Supervisar la concesión de permisos para construir en zonas de riesgo o inadecuadas para uso habitacional.
- Mejorar los servicios de alcantarillado y abastecimiento de agua potable, haciendo énfasis en mitigar los conflictos generados por las recientes obras públicas de drenaje en el municipio, lo anterior tendría que ser un esfuerzo general por drenar de manera eficiente la cuenca del Valle de México.
- Remover los basureros de Chiconautla, Industrias Tulpetlac, Tablas del Pozo, Santa Clara, San Agustín, y El Chamizal.
- Implementar un plan eficiente de manejo de residuos sólidos urbanos en todos los niveles: recolección, separación, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los mismos, de acuerdo con la legislación ambiental vigente: NOM-083-SEMARNAT-2003.
- Promover campañas de educación ambiental hacia la población y el sector industrial, fomentando prácticas sustentables como la reducción de generación de residuos, la adecuada separación de los mismos y el compostaje.
- Aplicar sanciones legales a empresas y personas físicas que viertan residuos en vía pública.

11.0 Literatura citada

- Aguilar I, A. (2010). Calidad del agua. Un enfoque multidisciplinario.
- Alados, C. L; Komac, B; Bueno, C. G; Gartzia, M., E, J; GARCÍA, D. G; Pueyo, Y. (2011). Modelización de la matorralización de los pastos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su relación con el cambio global. *Proyectos de investigación en Parques Nacionales 2007-2010*, 101-123.
- Alatorre, N. (2007). La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental. México DF, México. Recuperado de: www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/descargas/cong_nal_06/tema_03/25_norberto_alatorre.pdf.
- Altieri, M. A. H; Liebman, S; Magdoff, M; Norgaard; Sikor, R., & Thomas, O. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad,.
- André, F, J., y Cerdá, T. (2006). Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económico y políticas públicas. *Cuadernos económicos de ICE*, (71), 71-91.
- Ariza, A. (2013). Productos LDCM Landsat 8. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia*. Recurso en línea: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (Aapresid). Recurso en línea: <http://www.aapresid.org.ar/blog/por-que-nos-inundamoscomo-se-puede-prevenir-que-pasa-con-nuestros-suelos/>
- Ayuntamiento de Ecatepec de Morelos, Estado de México. (2013). *Monografía: Ecatepec en el tiempo*. Recurso en línea: <http://www.ecatepec.gob.mx/wp-content/uploads/2016/05/MONOGRAFIA.pdf>
- Ayuntamiento de Ecatepec de Morelos, Estado de México. (2016). Plan de desarrollo municipal 2015-2018. Recurso en línea: http://ecatepec.gob.mx/UIPPE_2016/PDM%202016-2018%20-pag%20ecatepec%20uippe.pdf, http://ecatepec.gob.mx/historia_ecatepec/ y <http://www.ecatepec.com/historiaecatepec.htm>
- Badía, D. (2011). *iARASOL, Programa interactivo para el estudio y clasificación de suelos de Aragón*, España. Consulta en línea: <http://www.suelosdearagon.com/>
- Barragán. J. M. (1993). *Ordenación, planificación y gestión del espacio litoral*. Oikos Tau, Barcelona.
- Basterra, I. (2011). Cátedra de Fotointerpretación. UNNE Universidad Nacional del Nordeste. Recurso en línea: <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/sig.pdf>
- Buzai, G. D. B., & Claudia, A. (2006). *Análisis socio-espacial con sistemas de información geográfica* (No. 910.011 B992a). Buenos Aires, AR: Edit. Gepama.
- Camarasa-Belmonte A. M. (2002). Crecidas e inundaciones. En Ayala-Carcedo F.J y Olcina-Cantos, J. *Riesgos Naturales*. Editorial Ariel, S.A., Barcelona, España, pp. 859-861
- Carrasco, J. S., & Puebla, J. M. A. (2010). Metodología para la delimitación del espacio metropolitano a partir de la densidad del viario. In *Las nuevas áreas empresariales: promoción y recualificación del suelo industrial, logística y gobernanza: comunicaciones* (p. 20).
- Casa A., Gustavo. (1997). Mapa: climas del Estado de México, elaborado con información: Instituto de Investigación e Información Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGECEM). (1993). 'Atlas General del Estado de México'. Gobierno del Estado de México. Recurso en línea disponible en el Geoportal CONABIO.
- Carta europea de ordenación del territorio. (1983). *Consejo de Europa, Torremolinos*.

- Celestino, O.G y Martínez-Alegría, L. (2003). *Sistemas de información geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*. Editorial Alfa-Omega. 248 pp.
- Centro Nacional para la Prevención de Desastres CENAPRED. (2004). *Inundaciones*. 56 pp
- Chávez, V, A. (2010). La ingeniería civil y los servicios ambientales: Manejo de residuos en México. Especialidad: Ingeniería civil. México, DF. 50 pp. Recurso en línea: <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/8/LA%20INGENIERA%20CIVIL%20Y%20LOS%20SERVICIOS%20AMBIENTALES.PDF>
- Chero, L, W., & Bladé, E, C, E. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. In Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua: la precipitación y los procesos erosivos (pp. 155-164). Universidad de Córdoba.
- Chico, A, M. (2010). *Elaboración de un Sistema de Información Geográfica SIGMA como herramienta base para el programa de ordenamiento ecológico y territorial del municipio de Tequixquiac, Edo de México*. Tesis de Licenciatura. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. México. 134 pp.
- Chico, A. M; Montoya, A. (2011). Elaboración de un SIGMA como herramienta base para el programa de ordenamiento ecológico y territorial del municipio Tequixquiac, Estado de México. *En: La innovación geo-tecnológica como soporte para la toma de decisiones en el desarrollo territorial*. 247-273 pp.
- Chuvieco, E. (2002) *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, España.
- Comas, D. y Ruiz, E. (1993): *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*. Ariel Geográfica, Barcelona, 295 pp.
- DESINVENTAR: SISTEMA DE INVENTARIO DE DESASTRES (2014). <http://www.desinventar.net/DesInventar/main.jsp?countrycode=g13> [Consulta 18 de noviembre del 2014].
- Díaz Bonifaz, Diego Martín; Hernández Ruiz, José Francisco; Velasco Pérez, Alfredo; Castillo Santiago, Miguel Ángel; Montoya Gómez, Guillermo; (2008). Vulnerabilidad y riesgo por inundación en San Cristóbal de las Casas, Chiapas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, Enero-Abril, 83-122.
- Diaz-Delgado, C; Baró-Suárez, J,E; Bedolla-Lara, S; Díaz-Espíritu, J. C. (2011). Estimación de costos de daños directos por inundación en zonas habitacionales con empleo de curvas costo versus altura de agua alcanzada: caso de estudio valle de Chalco solidaridad, Estado de México. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, vol. II (3), 201-218 pp
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2).
- Dirzo, R. (1990). La Biodiversidad como crisis ecológica actual ¿Qué sabemos? *Ciencias*. 4 (Núm. Especial). México, pp. 48-55.
- Eastman, J, R. (2012). IDRISI SELVA: Guía para SIG y procesamiento de imágenes. *Clarck University*.
- Ezcurra, E. (1990). *De las chinampas a la megalópolis: el medio ambiente de la cuenca de México*. Fondo de cultura económica, la ciencia para todos (3era edición, 2003). México. 119 pp.
- Domínguez, M, R. (2000). Las inundaciones en la Ciudad de México. Problemática y alternativas de solución. *Revista Digital Universitaria*, Vol.1(2), 7 pp. Recurso en línea: <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/>

- Ebert, A., N. Kerle y A. Stein. (2009). Urban social vulnerability assessment with physical proxies and spatial metrics derived from air-and spaceborne imagery and GIS data. *Nat. Hazards*, vol. 48, pp. 275-294.
- Ellis, E. A., Romero, J. A., Hernández, I. U., Gallo, C. A., & Alanís, J. L. (2012). Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz. *Avances de investigación Agropecuaria*, 16(1), 7-28.
- Errázuriz, K, A, M; Cereceda, T, P; González, L, J, I; González, L, M; Henríquez, R, M; Rioseco, H, R. (1998). *Manual de Geografía de Chile*. Editorial: Andrés Bello. Santiago, Chile. 77- 84 pp.
- Fallas, J. (2003). Conceptos básicos de cartografía. *Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales*. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Fernández, R. (2010). Primer curso para países sudamericanos de habla hispana sobre metodologías de evaluación de la degradación de tierras en zonas áridas, en el contexto del Proyecto LADA/FAO. República de Argentina.
- Franco, M, S; Valdez, P, ME. (2003). *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. UEM. Toluca, Estado de México. pp 107-108
- Fuente, L, S; Marquínez G, J. L. (2014). Relación entre cambios de uso del suelo y riesgo de inundaciones en la cuenca del río Nervión.
- Gómez, V, M. (2007). Hidrología urbana. Instituto Flumen: Dinámica fluvial e ingeniería hidrológica. Barcelona, España. Pp 1- 10.
- García, J, M; Anguiano, E. (2015). Peligro bajo Ecatepec: crónica de una serie de agravios. *AGUA PARA TODOS, agua para la vida*: <http://aguaparatodos.org.mx/peligro-bajo-ecatepec-cronica-de-una-serie-de-agravios/>
- García, O, J, A; Cedillo, G, J, G; Juan, P, J, I; Balderas, P, M, A. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, (55-56), 63-73
- González, V, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid, España. 744 pp
- Granados, M, D ; Campos, M, J, C. (2005). De la Sierra de Guadalupe y de cómo rescatar sus tesoros. *La Jornada, UNAM*
- Gutiérrez Puebla, J. Y Gould, M. (1994): *SIG: Sistemas de Información Geográfica*, Editorial Síntesis, Madrid, 251 pp.
- Gutiérrez. H. A., Gutiérrez. P., Villavicencio. O. E. (2011). Sistema de Información Geográfica Municipal de Lerma (SIG-Lerma), Estado de México. *Ayuntamiento de Lerma, México*. 25 p.
- Hansen, A, F, A. (2008). Apuntes de cartografía. Aguascalientes, México: *INEGI*. 103 pp.
- Hernández, P, J. *Sistemas de proyección*. Chile. 11 pp. Consulta en línea <http://www.gep.uchile.cl/Biblioteca/Sistemas%20de%20coordenadas/01a%20Sistemas%20de%20Proyecci%C3%B3n.pdf>
- Heuvelodp, J; Pardo, T, J; Quirós, C, S; Espinoza, P, L. (1986). El concepto de clima. En: *Agroclimatología tropical*. EUNED: Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. Pp 7- 8
- Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (*IGCEM*). http://igcem.edomex.gob.mx/acerca_igcem
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1984). Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_de_imagenes_landsat.pdf

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Municipio: Ecatepec de Morelos, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ecatepec de Morelos, Estado de México. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/15/15033.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2010). Censo de población y vivienda; Guías de interpretación cartográfica: Edafología, geología, uso de suelo y vegetación. <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/relieve.aspx?tema=me>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2015). Encuesta intercensal 2015: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/>
- Jordán G, M. J. (2016). Vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio de Tenancingo, Estado de México. Tesis de Maestría. UAEM, Facultad de Planeación Urbana y Regional, México. 182 pp.
- Juan-Pérez, J.I. (2007). Manejo del ambiente y riesgos ambientales en la región fresera del Estado de México Edición electrónica gratuita. Texto completo en www.eumed.net/libros/2007a/235/
- Klees, D. R., & Coccato, C. (2005). Residuos sólidos urbanos. Universidad Nacional del Nordeste. *Comunicaciones científicas y tecnológicas*. República Argentina.
- López L, E. J., Posada S, J. C., Navarro, M., & Gabriel, J. (1998). Los Sistemas de Información Geográfica. In Rodríguez García, J. y Collado Machuca, JC (eds.). *Andalucía en el umbral del Siglo XXI*. Congreso de Ciencia Regional de Andalucía (1. 1997. Jerez de la Frontera), 789-804. Universidad de Cádiz.
- Macedo-Cruz, A; Pajares-Martinsanz, G, & Santos-Peñas, M. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44(6), 711-722. Consulta en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000600010&lng=es&tlng=es.
- Martínez-Alegría L, R; Taboada C, J; Celestino O, G; Lanaja del Busto, J, M. (2000). Análisis multicriterio para la selección de emplazamientos de vertederos de residuos sólidos en el entorno de Valladolid. *Mapping*, (60), 28-32
- Maskrey, A. (Ed.). (1998). *Navegando entre brumas: la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgos en América Latina*. Soluciones Prácticas.
- Mendoza M, J. B., & Orozco H, M. E. (2014). Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la zona metropolitana de Toluca, México. *Luna Azul*, (38), 86-104.
- Moreno J, A. (1991): "Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel", *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 6, 30, pp. 155-170
- Muñoz, D, H, LI. (2012). Tasa de Transformación n del Hábitat del PN Cofre de Perote 1995-2012. *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*. 43 pp
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. F.A.O. Clasificación de los suelos. <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/clasificacion-de-suelos/es/> ; Guía para la descripción de suelos: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf> ; La microcuena en el ámbito de planificación de los

recursos naturales: <http://www.fao.org/climatechange/30329-07fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>

<http://www.fao.org/climatechange/30329-07fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2013). *Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México. Resumen Ejecutivo*.
- Ortiz P, M, A; Romo, M; (2001). Riesgo de inundación en la llanura fluvial del curso bajo del río San Pedro, Nayarit. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, agosto, 7-23.
- Pérez, G, C; Muñoz, N, A. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Univerisdad de Salamanca, España. Pp 7-9.
- Periódico Diario de Yucatán. (2017). Entregan 8,000 pesos a damnificados por inundacione en Ecatepec. Recurso en línea: <http://yucatan.com.mx/mexico/breves-de-la-republica/entregan-8-mil-pesos-damnificados-inundaciones-ecatepec>
- Periódico La Jornada (2004). *Entregan 630 casas construídas sobre la Sosa Texcoco*. Recurso en línea: <http://www.jornada.unam.mx/2004/04/17/031n2est.php?printver=1&fly=>
- Periódico La prensa. (2017). *Hay mala calidad del aire en Ecatepec y Coacalco*. Recurso en línea: <https://www.la-prensa.com.mx/metropoli/176516-hay-mala-calidad-del-aire-en-ecatepec-y-coacalco>
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (69), 33-52.
- Pontius, R. G., E. Shusas and M. McEachern (2004), "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), pp. 251–268.
- Poyatos, B, M., y Girón, W. (2009). Sistema de Información Territorial Municipal e Intermunicipal-SITMI-en Guatemala. *Mapping: Map and Sig consulting*, (136), pp. 67-71.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PAOT). (2003). Informe anual: Uso de suelo. Recurso en línea: http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/informes/informe2003_borrarme/temas/suelo.pdf
- Pujadas, R. y Font, J. (1998). Ordenación y planificación territorial. Editorial Síntesis, colección Espacios y Sociedades, serie mayor, Madrid, 399 pp. / Jorge Olcina Cantos.
- Ramos, N,b, I., Galano, S., Estrada, R., & Martín, G. (2009). Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 9, 17.
- Reinoso, a, E; Torres, P-N, M, A; Jaimes, T, M; Franco, V; Domínguez, M, R & Pozos, E, Ó. (2012). Escenarios de pérdidas por inundación pluvial en la ciudad de México ante la falla de algún componente del Sistema de Drenaje Principal.
- Rodríguez, E. J. A. Los datos geográficos: Conceptos básicos y operaciones de proyección, edición e incorporación. En: Moreno Jiménez, A. (2005, coordinador): *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de auto aprendizaje con ArcGIS. Madrid*, Editorial RA-MA, 895 páginas y CD de datos, ISBN: 84-7897-665-5.
- Rodríguez S, M. A., & Rebollar P, M. (2005). Selección primaria de zonas para la construcción de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial Caso de estudio: Municipios del Estado de México. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica*, 1(1).
- Rodríguez, F. (2008). Taller: Introducción a Aplicaciones de Técnicas Espaciales para la Conservación de la Biodiversidad. Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá.
- Rodríguez, T, A. (2013). Diagramas de Voronoi. CINVESTAV, Tamaulipas. Recurso en línea: <http://www.tamps.cinvestav.mx/~ertello/gc/sesion16.pdf>

- Salinas, C, J. (2008). Cancelan concesión del basurero de Chiconautla. *La Jornada en línea*: <http://www.jornada.unam.mx/2008/02/01/index.php?section=estados&article=036n1est>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. <http://www.semarnat.gob.mx/> ; Indicadores básicos de desempeño ambiental. Generación total y *pér capita* de residuos sólidos urbanos http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores13/conjuntob/indicador/04_residuos/4_2.htm
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos naturales, SEMARNAT. (2007). Política y Estrategias para la Prevención y Gestión Integral de Residuos en México. Recurso en línea: http://siscop.inecc.gob.mx/novedades/politica_y_estrategias_gir.pdf
- Servicio Geológico Mexicano. SGM. <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/rocas/rocas-igneas>
- Silva Schweitzer, A. M., & Rubio Farinelli, M. L. (2014). Análisis de cambios de uso del suelo en la Delegación Municipal de Ingeniero White (Buenos Aires, Argentina): aplicación de geotecnologías. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 23(1), 133-146.
- Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas del Estado de México (SEANPEM). Sierra de Guadalupe. Recurso en línea: http://areasnaturales.edomex.gob.mx/sierra_guadalupe
- Tarbuck E.J., Lutgens F.K. y Tasa, D. (2005). Cap. VII. Rocas sedimentarias en: *Ciencias de la Tierra*. Editorial: Prentice Hall, 8ª edición. 201-225 pp. <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/LibroTarbuck.html>
- Tomlin C (1990). *Geographic information systems and cartographic modelling*. Prentice Hall
- Toscana, A; Campos, V, M. M., & Monroy G, J. F. (2010). Inundaciones, protección civil y habitantes de San Mateo Atenco, Estado de México. *Investigaciones geográficas*, (72), 68-81.
- Tosini, M. A., & Pantaleone, L. (2012). Clasificación de cultivos a partir de imágenes satelitales LANDSAT EM. In *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Valdés (2013). Monografía Ecatepec en el tiempo recurso en línea: <http://www.ecatepec.gob.mx/wp-content/uploads/2016/05/MONOGRAFIA.pdf>; información del Ayuntamiento municipal: http://ecatepec.gob.mx/historia_ecatepec/ y las páginas: <http://www.ecatepec.com/historiaecatepec.htm>
- Trujillo y González: <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/114-numero-153/225-las-epidemias-de-viruela-y-tifo-en-el-siglo-xviii.html>
- Vázquez, J. R., Manrique G. I y Ramos, B. R. (2014). SIG aplicado a la evaluación de vulnerabilidad por inundación en la ciudad de Tixtla, Guerrero. México. *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio: XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica*, celebrado del 25 al 27 de junio de 2014, en Alicante. Madrid: AGE, 2014. ISBN 978-84-940784-4-6, pp. 153-162.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. R. D., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37.
- Velázquez, A., Torres, A., & Bocco, G. (2003). *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales. México: Rústica Existencia*.

- Vera P, M., & López B, J. (2010). Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005). *Investigaciones geográficas*, (73), 22-40.
 - Vila, J y Varga, D. 2008. Los sistemas de información geográfica. En Andrés, P y Rodríguez, L. *Evaluación y prevención de riesgos en Centroamérica*. Girona, España. Pp. 372-373.
 - Villegas, P, R., Muñoz R, C. A., Muñoz J, B. O, Gallo G, C. A., & Ponce, R. J. L. (2011). Tasa de cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003–2011.
 - Watson, D. F. y G. M. Philip. (1985). *A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation*. *Geoprocessing* 2:315–327
-