



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**PATRONES DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO,
EN EL MUNICIPIO DE ZAPOTITLÁN SALINAS, PUEBLA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

PRESENTA:

MAYRA MÓNICA HERNÁNDEZ MORENO

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS
FACULTAD DE ESTUDIO SUPERIORES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM
DR. ENRIQUE A. CANTORAL URIZA
FACULTAD DE CIENCIAS Campus Juriquilla, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**PATRONES DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO,
EN EL MUNICIPIO DE ZAPOTITLÁN SALINAS, PUEBLA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

PRESENTA:

MAYRA MÓNICA HERNÁNDEZ MORENO

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS
FACULTAD DE ESTUDIO SUPERIORES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM
DR. ENRIQUE A. CANTORAL URIZA
FACULTAD DE CIENCIAS Campus Juriquilla, UNAM

COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

OFICIO CPCB/146/2021

ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
P r e s e n t e

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **30 de noviembre de 2020** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **DOCTORA EN CIENCIAS** de la estudiante **HERNÁNDEZ MORENO MAYRA MÓNICA** con número de cuenta **91586210** con la tesis titulada "**Patrones de cambio de cobertura y uso del terreno, en el Municipio de Zapotitlán Salinas, Puebla.**", realizada bajo la dirección del **DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DR. RAFAEL LIRA SAADE
Vocal: DR. ALEJANDRO CASAS FERNÁNDEZ
Secretario: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
Suplente: DRA. PATRICIA DOLORES DÁVILA ARANDA
Suplente: DR. FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 23 de febrero de 2021

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Unidad de Posgrado, Edificio D, 1º Piso. Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria
Alcaldía Coyoacán. C. P. 04510 CDMX Tel. (+5255)5623 7002 <http://pcbiol.posgrado.unam.mx/>

Agradecimientos Institucionales

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM por permitirme continuar con mi formación académica.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología, COMECyT por las beca otorgadas para la realización de este trabajo, Folios 08BED00036 y 11BTD0052

Por el financiamiento otorgado, a los proyectos:

Macroproyecto Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano de la UNAM, SDEI-PTID-02.

PAPIIT-DGAPA-UNAM: IN212407, IN211410, IN225916, IN225010.

CONABIO: JM002, JM003, JM009 y JM010 de

PAPCA 2007-2008 Num 56 de la FES Iztacala

A mi Tutor Principal:

Dr. Oswaldo Téllez Valdés, por todo su apoyo y los conocimientos brindados para la realización de este trabajo.

A los miembros del Comité Tutor:

Dr. Enrique Martínez Meyer, por compartir su conocimiento, su apoyo permanente y todas las aportaciones realizadas a este trabajo.

Dr. Enrique Cantoral Uriza, por sus comentarios tan asertivos, su confianza y amabilidad.

Agradecimientos a título personal

A los miembros del Jurado Dr. Rafael Lira Saade, Dr. Alejandro Casas Fernández, Dra. Patricia Dávila Aranda y Dr. Fermín Pascual Ramírez por el tiempo destinado para la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorarlo.

A mi tutor, Oswaldo Téllez, por su apoyo en lo académico y en lo personal, por su amistad y su confianza. “Gracias Téllez”

A mis tutores, Dr. Enrique Martínez-Meyer y Dr. Enrique Cantoral Uriza por acompañarme durante el camino, y por su valiosa amistad.

A mis Maestros: Dr. Jorge López Blanco, Dr. Lorenzo Vázquez Selem, Dr. Ángel Priego Santander y Dr. Gerardo Bocco Verdinelli. A todos por sus conocimientos, por enseñarme el camino de la Geografía Ambiental y por su cordial y amable recibimiento en sus laboratorios. Al Dr. Jean Francois Mas, por sus oportunos comentarios que mejoraron mi trabajo. ¡Gracias por siempre!

A la Dra. Patricia Dávila Aranda, por su apoyo hoy y siempre.

A Vladimir Anaya, Alejandra Gámez, Elizabeth Benítez, Alejandro Salas, Jose Luis Pérez, Luis Correa, Consuelo Pacheco, Luis Adalberto, Víctor Martínez, Viviana Cervantes, Seltzint Bautista, Luis Alfredo Islas, Arlette Juárez, Elisa López, Yury Cedillo, Mario Guerra, José de Jesús Quevedo, Adrián Acevedo, Aline Téllez, Gerardo Tejeda, Víctor Lozano, Carlos Ferrer, Edgar Salazar, Adrián Estrada, Javier Hernández, Efraín Urióstegui, Milhem Rivera, Susana Equihua, Zuleyma Espinosa, Fernanda Reséndiz, Daniela Cuéllar, Javier Álvarez, Mónica Ambriz, Elideth Pluma, Damián Rosas, Palestino Gómez, Alby Soriana, Diana Laura Ávila, Olga Méndez, Lizeth Silva, Carlos Villagrán, Daniel Hernández y al grupo 2653 de manejo de recursos naturales del semestre 2018-2. A todos y todas por su confianza, su frescura y por ser el motor que no me permite detenerme.

Al Maestro Humberto Macías Cuéllar, por su ayuda y apoyo permanente para el desarrollo de este trabajo, desde lo conceptual y metodológico, hasta lo logístico y lo loco. Por no dejarme caer en el peor momento de mi vida, y por enseñarme que le debemos el camino a muchas piernas, a dar gracias a la lluvia y buenos días a la hierba... ¡Gracias Flaco!

Al M. en C. Leobardo Sánchez Paredes, por su valioso apoyo en el trabajo de campo y su amistad incondicional.

Al M. en C. Luis Alfredo Islas Saldaña y a la M. en C. Arlette Juárez Hernández, por su valioso apoyo en el trabajo de programación y modelación espacial y su linda amistad.

Al Dr. Víctor Manuel Salazar Rojas, por creer en mí y abrirme la puerta para construir, en comunidad, un camino basado en la confianza y el respeto.

A la Dra. Teresa González Ruiz, la Mtra. Josefina Vázquez Medrano, la Dra. Alina Uribe García, y la Dra. Monserrat Espinosa González, por todas sus porras y por haber dicho las palabras precisas en el momento adecuado. *¡Gracias amigas!*

Al Dr. Hibraim Pérez Mendoza, por su amistad, acompañamiento y asesoría. Porque *“era el empujón que faltaba”*. ¡Gracias!

A Georgina García Morán por todo su apoyo y disposición para realizar los trámites administrativos.

A Diana Juárez, Alejandro Rodríguez, Carmen Serranía, Luis Oseguera y Maritza Lozano, por estar conmigo en las buenas, en las malas y en las peores. *¡Los quiero!*

A mi **madre, padre y hermana** por siempre estar y por su apoyo incondicional que me permitió lograr esta meta. Por cuidar a mis cachorras cuando me voy al campo, porque sé que todo está bien.

A **Humberto, Ana y Abril** por su amor, su paciencia, su tiempo y por creer en mí. *¡Los amo!*

A las autoridades municipales de Zapotitlán, Puebla y a las autoridades agrarias y personas que nos han acompañado en los núcleos agrarios de Zapotitlán Salinas, San Antonio Texcala, San Francisco Xochiltepec, Los Reyes Metzontla y San Pedro Atzumba, así como a las Asociaciones Chakaan Buulaan AC y Chakaan Occidente SC, por las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo.

A los pobladores del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, de quienes he aprendido a mirar al mundo desde una perspectiva distinta. Especialmente a Pablo Camarillo, Angi, Andrea, Rosi, Doña Rosa, Tere, Don Fili, al Ingeniero Diego Barragán, a Doña Magos y sus familias, a los miembros del Comité de Turismo, a la Maestra Amalia Aportela, profesoras y alumnos de la Escuela Primaria Profesor Rafael Ramírez de San Martín del Valle. A todos y todas, por su amistad y por abrirme las puertas de su casa, acompañarme en este largo camino y permitirme ser parte de su familia y de su *“tierra”*.

También, a Don Vicente, Don Raymundo “El Tica”, Memo, Don Hermengildo, Don Enrique, Don Pablo y sus familias; y a todas las personas que me apoyaron en San Antonio Texcala, gracias por su hospitalidad y aprecio.

Y a todas las personas que me apoyaron y acompañaron, pues siendo tantas, la memoria no me alcanza.

Por último, pero no menos importante, a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala y a la Universidad Nacional Autónoma de México por ser el espacio para mi desarrollo profesional y mi segunda casa.... *“Por Mi Raza Hablará el Espíritu”*

Dedicatoria

A la libertad... porque “nuestros sueños no admiten prisión” (I del Valle)

A mi Madre Rosa María Moreno[†] que encontró la libertad.
Por tu amor a los tuyos, que es tu legado.
Porque siempre creíste y estuviste junto a mi,
a la distancia necesaria, prudente, y siempre a la espera.
Porque sé que hoy estás conmigo...

A Humberto, mi amor, mi contradicción, mi compañero de vida. *¡Porque la Tierra giró y porque lo demás, es lo de menos!*

A mi hija Ana Carolina: sigue, no te detengas, busca, insiste, agradece, camina, vuela, ama, ríe, baila, canta, grita. Y cuando estés cansada, respira y sigue...
¡Gracias por existir!

A mi hija Abril Sabina: mi compañera, siempre solidaria y amorosa, tu grandeza está en tu ser y tu andar por la vida. *¡Gracias por existir!*

A mi Padre Martín Hernández, porque soy tu esencia y porque me enseñaste cómo recuperar lo perdido.

Índice

Índice de Cuadros

Índice de Figuras

Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción.....	3
2. Antecedentes	8
2.1. Planteamiento del problema e impacto en el área de estudio	9
3. Hipótesis	12
4. Objetivos	13
5. Estrategia Metodológica.....	14
5.1. Área de estudio	14
5.2. Materiales y Métodos.....	17
5.2.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT)	17
5.2.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) de 1995 y 2007....	20
5.2.3. Identificación y análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT).....	20
6. Resultados	25
6.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT)	25
6.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno de 1995 y 2007	35
6.3. Patrones de cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT)	39
7. Discusión	60
7.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno.....	60
7.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno en 1995 y 2007	63
7.3. Patrones de cambio de cobertura y uso del terreno	64
7.4. Proyecciones del cambio de cobertura y uso del terreno al 2024 y el 2030	72
8. Conclusiones	74
9. Referencias bibliográficas	76
Anexo 1. Tasas de cambio total y anual registradas para el municipio con base en la cartografía digital de INEGI de uso de suelo y vegetación, en escala 1:250 000, series I a VI (INEGI, 1992, 2001, 2003, 2010b, 2013b, 2017).....	94
Anexo 2. Tipos de suelo (FAO, 2008) utilizados como variable explicativa para analizar las transiciones entre clases de CUT.....	97
Anexo 3. Manuscrito aceptado en la Revista Mexicana de Biodiversidad	98

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Leyenda de CUT jerarquizada en tres niveles.....	26
Cuadro 2. Superficie (hectáreas y porcentaje) y número de familias y especies por clase de cobertura vegetal y uso actual del terreno.....	30
Cuadro 3. Matriz de confusión entre clases del mapa de CVUT actual (2018) y los datos de referencia.....	34
Cuadro 4. Superficie en hectáreas y porcentaje por clase de cobertura vegetal y uso del terreno para 1995 y 2007.	35
Cuadro 5. Tasas de cambio calculadas en el período 1985 – 2014, a partir de las series I a VI de INEGI.....	39
Cuadro 6. Superficie de cambio en hectáreas por clase de cobertura vegetal y uso actual del terreno en los períodos 1995-2007 (t1-t2), 2007-2018 (t2-t3) y 1995-2018 (t1-t3).....	40
Cuadro 7. Proyecciones al 2024 y 2030 del CCUT en los escenarios de derogación (D) y mantenimiento (M) del decreto de la RBTC.....	49

Índice de Figuras

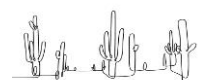
Figura 1. Localización del municipio de Zapotitlán, Puebla.....	16
Figura 2. Diagrama metodológico.....	24
Figura 3. Porcentaje de importancia de las variables para el modelo de bosques aleatorios, indicando los valores de exactitud total y del índice de Kappa obtenidos para los clasificadores empleados en la etapa de evaluación y selección del modelo.....	28
Figura 4. A) Cobertura vegetal y uso actual del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla. B) Mapa de puntos de verificación en campo. C) Ubicación del municipio en Puebla.....	29
Figura 5. Imágenes de las clases de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla.....	31
Figura 6. Composición de imágenes que muestra la distribución de las asociaciones vegetales en forma de mosaico y los límites entre ellas.....	32
Figura 7. Mapa de cobertura vegetal y uso del terreno de 1995.....	36
Figura 8. Mapa de cobertura vegetal y uso del terreno de 2007.....	38
Figura 9. Superficie de cambio en hectáreas de cobertura vegetal natural (CVN), zonas agrícolas (ZA), asentamientos humanos (AH) y zonas sin cobertura (SC) en los períodos 1995-2007, 2007-2018.....	39
Figura 10. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2007 y de 1995 a 2018.....	41
Figura 11. Corte de los mapas que ilustran el crecimiento de los asentamientos humanos de 1995-2007-2018.....	42
Figura 12. Matriz de transición con tasas de cambio neto (A) y anual (B) para el período 1995–2007.....	43
Figura 13. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición de las zonas agrícolas a los asentamientos humanos de 1995 a 2007; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición.	44

Figura 14. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del matorral espinoso con espinas laterales a las zonas agrícolas, de 1995 a 2007; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición.....	45
Figura 15. Tasas de cambio neta (A) y anual (B) para el período 2007–2018.....	46
Figura 16. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del cardonal de <i>C. columna-trajani</i> a las zonas sin cobertura con suelo degradado, de 2007 a 2018; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición.....	47
Figura 17. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del matorral crasi-rosulifolio de <i>Dasyilirion</i> y <i>Agave</i> a las zonas sin cobertura con suelo degradado, de 2007 a 2018; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición.....	48
Figura 18. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2024, en los escenarios de derogación (D-DR) y mantenimiento (M-DR) de la RBTC.....	50
Figura 19. Proyecciones del CCUT al 2024, bajo el escenario de derogación del decreto (D-DR) de la RBTC	51
Figura 20. Proyecciones del CCUT al 2024, bajo el escenario de mantenimiento del decreto (M-DR) de la RBTC	52
Figura 21. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2030, en los escenarios de derogación (D-DR) y mantenimiento (M-DR) de la RBTC.....	53
Figura 22. Proyecciones del CCUT al 2030 bajo el escenario de derogación del decreto (D-DR) de la RBTC.....	54
Figura 23. Proyecciones del CCUT al 2030 bajo el escenario de mantenimiento del decreto (D-DR) de la RBTC.....	55
Figura 24. Trayectoria de los cambios entre 1995 y 2030, en el escenario de derogación del Decreto de la RBTC.....	56

Figura 25. Trayectoria de los cambios entre 1995 y 2030, en el escenario de mantenimiento del Decreto de la RBTC.....	57
Figura 26. Trayectoria de los cambios de la superficie (hectáreas) de 1995 a 2030, en los escenarios de derogación (D) y mantenimiento (M) del Decreto de la RBTC.....	58
Figura 27. Trayectorias de los cambios al 2024 y 2030, que ilustran el crecimiento de los asentamientos humanos, en los escenarios de derogación (A y B) y mantenimiento del decreto de la RBT (C y D).....	58
Figura 28. Similitud entre el mapa de cobertura vegetal y uso actual y los modelos generados a 12 años, bajo el escenario de derogación del decreto de la RBTC, usando ventanas de 3x3 y 5x5 pixeles.....	59
Figura 29. Similitud entre el mapa de cobertura vegetal y uso actual y los modelos generados a 12 años, bajo el escenario de mantenimiento del decreto de la RBTC, usando ventanas de 3x3 y 5x5 pixeles.....	59
Figura 30. Relación entre el uso del terreno y las formas de transformación de la cobertura del terreno (Geist et al., 2006).....	72

Resumen

La investigación sobre el Cambio de Cobertura y uso del Terreno (CCUT) ha recibido atención los últimos 30 años debido a su vinculación con los problemas de importancia mundial, ya que es un fenómeno asociado a procesos ambientales, sociales y económicos muy relevantes. Las zonas áridas y semiáridas revisten gran importancia debido a la extensión que ocupan en el planeta, y debido a que proveen una elevada cantidad de bienes y servicios ecosistémicos, entre ellos la producción de alimentos, fibras, forraje, leña y productos bioquímicos. Además proveen la regulación del clima a nivel local, la captación de carbono y por la diversidad e identidad cultural que alojan. Son, sin embargo, sistemas muy vulnerables a la degradación, asociada al impacto de las actividades humanas. No obstante, los trabajos acerca del CCUT de las zonas áridas y semiáridas son muy escasos a escala local. El Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC), es una de las zonas semiáridas más importantes del país, siendo reconocido como un centro de megadiversidad biológica y endemismo a nivel mundial. En el presente trabajo se llevó a cabo la identificación general de los patrones de CCUT, en el período transcurrido entre 1995 y 2018, en el territorio correspondiente al municipio de Zapotitlán, Puebla, dentro del VTC. De manera particular se logró: 1. Identificar y cartografiar la distribución espacial actual de la cobertura vegetal y el uso que se le da al terreno en el municipio en escala 1:50,000. 2. Analizar y modelar los patrones espaciales de cambio en la cobertura y uso del terreno, entre 1995 y 2018, con la finalidad de identificar las tendencias de estos cambios, a partir del decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán. 3. Localizar espacialmente las áreas en donde se registran los tipos de CCUT más importantes, y 4. Discutir las causas que se relacionan con el CCUT. Lo anterior representa el establecimiento de una línea base de seguimiento del CCUT en la zona.



Abstract

Research on Land Use and Cover Change (LUCC) has received attention in the last 30 years due to its connection with global problems of great importance, since it is a phenomenon associated with environmental, social and economic processes. Arid and semi-arid zones are of great importance due to its wide distribution on the planet, and since they provide a significant amount of ecosystem goods and services, including the production of food, fiber, forage, firewood and biochemical products. In addition, they provide the regulation of local climate, carbon sequestration, biodiversity and harbor a great human cultural diversity and identity. Unfortunately, they are highly vulnerable to degradation, due to the impact of human activities. Nevertheless, LUCC studies in arid and semi-arid zones are very scarce at the local scale. The Tehuacán-Cuicatlán Valley (TCV) is one of the most important semi-arid areas in the country. It has been recognized as a center of biological mega-diversity and endemism worldwide. The present work shows the general identification of the LUCC patterns, in the period between 1995 and 2018, in the territory corresponding to the municipality of Zapotitlán, Puebla within the TCV. In particular, the following actions were accomplished: 1. Identification and mapping of the current spatial distribution of the land use and vegetation cover of the municipality by a map on a scale of 1:50,000. 2. Analysis and modelling of the spatial patterns of land use and cover change, between 1995 and 2018, to identify the trends of changes, based on the decree of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve. 3. Spatially location of those areas where the most important exchange rates have been recorded, and 4. To discuss the causes related to the LUCC. This represents the establishment of a baseline for monitoring the LUCC in the region.



1. Introducción

El Cambio de Cobertura y Uso del Terreno (CCUT), o LUCC por sus siglas en inglés (*Land Use and Cover Change*) (Lambin y Geist, 2006; Turner II et al., 2007) o LCLUC (*Land-Cover Land-Use Change*) (Serra et al., 2008), es un fenómeno de importancia mundial, asociado a procesos ambientales, sociales y económicos. Es el resultado de la interacción de fuerzas directrices estructurales y funcionales (Liu y Deng, 2010), vinculadas con las condiciones ambientales, la demanda de bienes y servicios, la capacidad tecnológica y las relaciones sociales (Foley et al., 2005; Overmars y Verburg, 2005; Pelorosso et al., 2009; Pereira e Silva et al., 2020; Van-Asselen y Verburg, 2013).

La investigación sobre el CCUT ha recibido atención los últimos 30 años, debido a su vinculación con problemas de importancia mundial, como son el cambio ambiental global (Turner II et al., 2008), la seguridad alimentaria (Van-Asselen y Verburg, 2013), la salud humana (Balthazar et al., 2015), la urbanización (Geist y Lambin, 2004), la migración transfronteriza (Turner II y Robins, 2008), la degradación del suelo (Bai y Dent, 2009), la calidad del agua (Orr et al., 2017) y la preservación de la biodiversidad y de los refugios ambientales (Mas et al., 2009), entre otros (Camacho-Sanabria et al., 2015, 2017; Pereira e Silva et al., 2020; Pineda et al., 2009). Por tanto, dado que el CCUT opera en la interfase entre las ciencias naturales, sociales y económicas, resulta insuficiente generar estudios aislados solamente desde las perspectivas de cada una de estas disciplinas, sino que se requiere tener un enfoque articulado que permita integrar el análisis de toda la complejidad y las dimensiones de este fenómeno (Chowdhury, 2006; Foley et al., 2005; Keys y McConell, 2005; Lambin, 2005; Overmars y Verburg, 2005; Serra et al., 2008; Van-Asselen y Verburg, 2013).

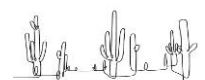
Estudiar la dinámica de cambio de la cobertura y el uso del terreno implica: A) Identificar y clasificar los diferentes tipos de CUT, en al menos dos fechas distintas. B) Detectar la localización espacial de los cambios. C) Analizar los patrones espaciales de los cambios ocurridos en dos tiempos, para identificar qué sitios sufrieron un proceso de conversión de un tipo de cobertura a otro y cuáles registraron un proceso de modificación (cambio en el mismo tipo de cobertura del terreno) (Batunacun et al., 2018; Etter et al., 2006; Liu y Deng, 2010; Plieninger y Schaar, 2008). D) Modelar dichos patrones espacio-temporales, empleando el



enfoque y método específico según la escala, la región y las dimensiones de los cambios identificados, considerando el sistema acoplado humano-ambiente (Camacho-Olmedo et al., 2018; Chang Martínez et al., 2020; Leija-Loredo et al., 2016; Mas et al., 2014a). E) Analizar la causalidad de los cambios, partiendo de diversas hipótesis, siendo la más frecuente, que el CCUT es desencadenado y controlado por factores demográficos y las consecuentes actividades productivas (Geist et al., 2006; Overmars y Verburg, 2005; Owar-Othow et al., 2017; Wyman y Stein, 2010). Este análisis puede realizarse desde diferentes perspectivas y enfoques, tales como el estudio histórico de las variables que propician el cambio (Breceda et al., 2012; Chowdhury, 2006; Turner II y Robins, 2008), la generación de modelos de regresión en donde se correlacionen los cambios en la cobertura con los cambios en variables socioeconómicas (Figuroa et al., 2009; Etter et al., 2006; Pineda et al., 2009; Serra et al., 2008; Veldkamp y Lambin, 2001) y aquellos en los que se incorpora la visión de los usuarios del terreno y tomadores de decisiones (Basupi et al., 2017; Mottet et al., 2006; Overmars y Verburg, 2005).

Por ello, el estudio del CCUT dependerá de la escala espacial y temporal de trabajo, que se relaciona con el nivel de exactitud obtenido con el muestreo en campo, mediante el que se valida y verifica la información generada (Campbell et al., 2015; Leija et al., 2020; Mas et al., 2014b; Velázquez et al., 2002; Von Thaden et al., 2020). En ese sentido, identificar el tipo y magnitud de los cambios y las causas que los generan, indica si el desarrollo social y económico está equilibrado con la conservación de los recursos naturales a escalas mundial, regional y local (Velázquez et al., 2002); y permite identificar el origen de la decisión de este (Basupi et al., 2017; McCusker y Carr, 2006).

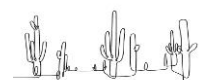
Por otro lado, es necesario vincular los estudios locales, regionales y globales, en el sentido espacial y dentro del contexto social y económico, ya que, no obstante que algunas variables de índole biofísico, social, económico o institucional explican el CCUT a escala regional, a escala local no lo hacen, y viceversa (Balthazar et al., 2015; Cortina, 2007; Lambin et al., 2001; Turner II y Robins, 2008). Esto ha motivado la necesidad de realizar más proyectos a escala local en los que se analicen las causas a ese nivel, para después conectarlas al ámbito regional. Es por ello que actualmente hay una tendencia a la aplicación de modelos multiescalares, para tratar de explicar los cambios y sus causas (Owar Othow et al., 2017; Paudel et al., 2016; Wyman y Stein, 2010).



Existe una relación sinérgica entre los cambios de uso del terreno (CUT) y los cambios de la cobertura del terreno (CCT), cuando éstos ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales (Lambin y Geist, 2006; Lambin et al., 2001; Turner et al., 2007). Es decir, el CCUT que ocurre a escala local en un determinado tiempo, repercutirá a nivel regional o global más adelante (Keys y McConell, 2005). Por ello es importante definir y diferenciar entre la Cobertura del Terreno (CT) y el Uso del Terreno (UT). La primera incluye a los atributos de la superficie terrestre y de su subsuelo, pero también incorpora a las construcciones hechas por el hombre, tales como carreteras, ciudades, presas, etc. (EIONET, 2020; Jansen y Di Gregorio, 2002; Lambin y Geist, 2006). Por su parte, el UT se refiere a la manera en la que los seres humanos aprovechan la CT para producir bienes y servicios para satisfacer sus necesidades materiales y espirituales (Chilar y Jansen, 2001; Lambin y Geist, 2006). Por todo ello, existe un vínculo estrecho entre CT y UT que es necesario identificar, cartografiar y cuantificar como una determinante de las acciones de uso, manejo y conservación de los recursos naturales, que repercutirá en el bienestar social, económico y ambiental de cualquier territorio.

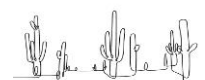
Las causas que promueven el CCUT se dividen en: 1) proximales o directas y 2) subyacentes o indirectas (Geist y Lambin, 2004). Las primeras son acciones que afectan directamente a la CT por las actividades de uso como la agricultura, el sobrepastoreo, la extracción de maderas y la construcción de infraestructura, (Chowdhury, 2006; Geist y Lambin, 2004; Owar Othow et al., 2017; Turner II et al., 2008; Wyman y Stein, 2010). Generalmente operan a nivel local (familia, finca o comunidad) y son la causa directa de la modificación de los ecosistemas por factores como el aumento de la frontera agrícola y su intensificación (Etter et al., 2006; Turner II y Robins, 2008; Van-Asselen y Verburg, 2013).

Las causas subyacentes o indirectas, sostienen a las proximales y generalmente las alteran; ellas incluyen factores ambientales, sociales, económicos, demográficos, tecnológicos, institucionales y culturales. Contrariamente a las proximales, operan desde el nivel regional y tienen efectos a nivel local (Geist et al., 2006; Turner II et al., 2008), pues interactúan a través de sistemas de retroalimentación, con algunos efectos sinérgicos en algunos casos (Geist y Lambin, 2004; Lambin et al., 2003; Turner y Robins, 2008).



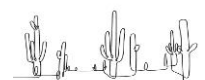
En general, las causas o fuerzas directrices que provocan el CCUT, dependen del contexto social, económico histórico, geográfico y ambiental-biofísico en el que ocurre el proceso, así como de la interacción entre todos estos factores (Lambin y Geist, 2006; Lesschen et al., 2005; Serra et al., 2008; Turner II et al., 2008). En particular para las zonas semiáridas, se ha identificado la interacción de diversos factores que cambian en tiempos y escalas específicos, entre ellos el clima, la calidad de los recursos biofísicos (suelo, agua y vegetación), la historia de uso del terreno, así como los factores sociales, económicos y políticos y las políticas gubernamentales imperantes. También influyen el desarrollo de infraestructura, los impactos entre los Estados y los legados históricos (Duraismy et al., 2018; Hole, 2009). Por ello, una gran cantidad de investigaciones giran en torno al análisis de la relación entre variables biofísicas y socioeconómicas (históricas o recientes), identificadas como las posibles fuerzas directrices del cambio (Chowdhury, 2006; Duraismy et al., 2018; Overmars y Verburg, 2005; Owar Othow et al., 2017; Wyman y Stein, 2010) y lo analizan en el ámbito del paisaje (Breceda et al., 2012; Corona-Núñez, 2008; López et al., 2006; Mottet et al., 2006; Pelorosso et al., 2009; Schoorl y Veldkamp, 2001; Serra et al., 2008). Por tal razón, estos estudios generan elementos básicos y fundamentales en la definición de políticas públicas para la conservación de las áreas naturales y manejadas (Figueroa et al., 2009; Puc-Alcocer et al., 2019; Velázquez et al., 2003; Verburg et al., 2006a).

Durante las dos últimas décadas, la modelación del CCUT se ha convertido en una estrategia útil para comprender, evaluar y proyectar el comportamiento futuro del CCUT, en el contexto del manejo y planificación territorial (Geist et al., 2006; Mas et al., 2014a), buscando entender las interacciones entre los factores involucrados en el fenómeno (Camacho-Olmedo et al., 2018; Pontius et al., 2004). El modelado es una técnica que usa representaciones artificiales de las interacciones dentro del Sistema de Uso del Terreno (SUT), para analizar las causas, y conocer la ubicación espacial, las consecuencias y las trayectorias del CCUT (Van-Asselen y Verburg, 2013; Verburg et al., 2006b). La modelación facilita la conducción de experimentos que prueben el conocimiento que se tiene de los procesos involucrados en el CCUT (Wyman y Stein 2010), y su descripción en términos cuantitativos, particularmente si se trata de modelos espacialmente explícitos y capaces de funcionar en varias escalas (Lambin *et al.*, 2001; Mas et al., 2014a; Pontius et al., 2004). Por ello, se requiere de un análisis cuantitativo de las variables, que ponga a prueba las hipótesis que se tienen de los CCUT, mediante la construcción de



escenarios posibles (Camacho-Sanabria et al., 2015; Veldkamp y Lambin, 2001; Verburg et al., 2006b). En ese sentido, el uso y desarrollo de los modelos predictivos del CCUT es muy útil para los investigadores, manejadores de la tierra y los tomadores de decisiones, involucrados en el desarrollo de políticas públicas (Camacho-Olmedo et al., 2018; Geist et al., 2006; Verburg et al., 2006b).

Diversos enfoques conceptuales y metodológicos han sido estudiados para generar múltiples opciones para modelar el CCUT, buscando integrar al sistema acoplado humano-ambiente como expresión de los procesos sociales, ambientales, institucionales y económicos (Mas et al., 2014a; Verburg et al., 2006b; Wassenaar et al., 2007), en diferentes tipos de modelos que pueden ser: estáticos o dinámicos, espaciales o no espaciales, inductivos o deductivos, basados en agentes o en patrones (Camacho-Olmedo et al., 2018; Mas et al., 2014a). Bajo este contexto, han sido desarrolladas numerosas herramientas para modelar el CCUT; en la actualidad, la tendencia favorece a aquellas que son de uso gratuito (Camacho-Olmedo et al., 2018). Entre ellas se encuentra el programa de modelación medioambiental *Dinamica EGO* (Soares-Filho et al., 2009), el cual permite la inclusión de impulsores de cambio, el cálculo de tasas de transición, así como la simulación de escenarios a futuro para monitorear las trayectorias de los cambios (Espinosa-Mendoza, 2016; Mas y Flamenco-Sandoval, 2011; Quiroz, 2009).



2. Antecedentes

Las zonas áridas y semiáridas revisten gran importancia en el estudio del CCUT debido a la extensión que ocupan en el planeta (Rotenberg y Yakir, 2010; Schimmel, 2010; Zaffar et al., 2005), debido a que proveen una importante cantidad de bienes y servicios ecosistémicos, incluyendo la producción de alimentos, fibras, forraje, leña y productos bioquímicos, la regulación del clima a nivel local, la captación de carbono; y también debido a la alta diversidad e identidad cultural que alojan (Zaffar et al., 2005). Sin embargo, la problemática que representa el estrés hídrico al que se ven sometidas, indica que son sistemas muy vulnerables a la degradación asociada al impacto de las actividades humanas (Orr et al., 2017). En México, las zonas áridas no son la excepción a ese problema, y su atención es de particular relevancia pues en el país las zonas áridas y semiáridas son importantes debido a la riqueza y diversidad de especies vegetales y a los altos niveles de endemismo que presentan (Dávila et al., 2002; González-Medrano, 2012; Montaña y Monroy, 2000; Rzedowski, 2006; Velasco-Molina, 1991). Adicionalmente, en ellas se encuentran más de 25 grupos indígenas, con un vasto conocimiento tradicional sobre sus recursos (Casas et al., 2014; González-Medrano, 2012; Montaña et al., 2006).

Se ha identificado que las zonas áridas y semiáridas pueden tener un efecto de secuestro de carbono en cantidades similares a las de los bosques de pino (Schimmel, 2010), contrarrestando los efectos del calentamiento global por las emisiones de CO₂ (Rotenberg y Yakir, 2010). Además, el efecto de reflectividad de la energía solar de estas zonas promueve el enfriamiento de la atmósfera a grandes altitudes. Es decir, posiblemente, la desertificación ha contribuido al enfriamiento local, para compensar el calentamiento global producido por la liberación de carbono por el desmonte de los bosques (Rotenberg y Yakir, 2010).

Los trabajos de CCUT de zonas áridas y semiáridas son muy escasos a escala local, debido a que son regiones heterogéneas, con vegetación muy dispersa y en muchos casos muy fragmentada (Schimmel, 2010), en donde hay un *continuum* de cambios a veces muy poco perceptibles, que son difíciles de identificar espacialmente y de cuantificar para establecer la dinámica de estos. En estas regiones los ecosistemas son muy vulnerables a los cambios climáticos y a la intervención humana (Duraisamy et al., 2018). Además, la evaluación de la

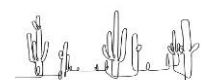


situación social y económica resulta compleja por la coincidencia de fenómenos de diversa naturaleza como la baja productividad de la tierra y la escasez del agua en el plano ambiental, la pobreza, la migración, la marginación, la desigualdad y los conflictos por la tenencia de la tierra, en los ámbitos social y económico (Breceda et al., 2012). Por estas razones, la literatura sobre el tema se ha enfocado en evaluar la degradación en estas zonas, basándose principalmente en el efecto de la pérdida de la cobertura del terreno (Geist et al., 2006).

2.1.Planteamiento del problema e impacto en el área de estudio

El Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC), una de las zonas semiáridas más importantes del país, ha sido reconocido como centro de megadiversidad biológica y endemismo a nivel mundial por la UICN (Dávila et al., 2002; Lira et al., 2009), el cual además posee una gran riqueza paleontológica y cultural (Casas et al., 2016; Pérez-Valladares et al., 2019; Valiente-Banuet et al., 2009). Como resultado de diversos factores naturales y humanos, en el VTC existen zonas con diversos niveles de deterioro, así como grandes extensiones de áreas conservadas. Este mosaico de formas de uso y grados de conservación del paisaje hacen de la región un modelo de estudio ideal para investigar el proceso de degradación en sus diferentes facetas y desde diversos puntos de vista. Dentro del VTC se encuentra el municipio de Zapotitlán, Puebla que presenta una problemática ambiental bien definida, con una baja productividad, desertificación, alteración de los sistemas naturales, desequilibrio en los procesos e interacciones ecológicas, así como, la disminución y pérdida de la biodiversidad (Muñoz et al., 2007).

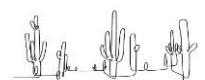
El VTC fue decretado como como Área Natural Protegida, con el carácter de Reserva de la Biósfera (DOF, 1998), y recientemente, “Patrimonio mixto de la Humanidad por la UNESCO”, por su valor natural y cultural (Hábitat Originario de Mesoamérica) (Guevara, 2018). En el decreto se manifiesta la necesidad de contar con un programa de manejo de la Reserva, que favorezca el ordenamiento del territorio, a partir del cual se definan estrategias de acción que tengan como meta principal la conservación de la biodiversidad del ANP a corto, mediano y largo plazo (SEMARNAT y CONANP, 2013). Esto, con la finalidad de mantener el sistema de monitoreo y evaluación del Fondo para Áreas Naturales Protegidas, en el que uno de los indicadores está orientado a medir el impacto general de las actividades de conservación



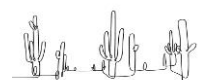
en la biodiversidad. A nivel de paisaje, el monitoreo biológico está enfocado al análisis de la transformación del hábitat, que determina el porcentaje de la vegetación de las ANP que ha sido transformada por actividades antropogénicas (CONANP y FMCN, 2003).

Bajo este contexto, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas estimó una tasa de transformación del hábitat en la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) de 0.29% entre los años 1986 a 2000, equivalente a 1 253 ha/año, transformándose 17 220 ha, en 14 años. Sin embargo, el análisis por periodos (80s, 90s, 2000) mostró un incremento continuo en la transformación del hábitat, en donde las selvas baja caducifolia y subcaducifolia y el bosque de encino, se transformaron en zonas agrícolas y pastizales inducidos dedicados a la ganadería (CONANP y FMCN, 2003). Por su parte, Figueroa et al. (2011), registraron un incremento neto anual en la superficie transformada (ST) de 673.3 ha/año, entre 1993 y 2002 y una tasa de cambio de ST de 0.14, lo cual en términos generales no se considera alta, debido a la superficie neta de la Reserva. Sin embargo, de acuerdo con los autores, el porcentaje de ST fue medio, pero con una alta tasa de cambio (mayor al promedio).

Por ser México un país megadiverso, que además presenta una gran complejidad cultural y social, es necesario tener un conocimiento sistemático sobre la dinámica socioambiental de las Reservas de la Biósfera del país (Figueroa et al., 2011), como instrumento de conservación de la diversidad biológica. Tomando en consideración que el municipio es la unidad político-administrativa reconocida para la elaboración del ordenamiento ecológico territorial, instrumento que regula el uso del suelo, con el que se especifican las áreas destinadas para la conservación de la biodiversidad, en ésta investigación se identificaron y analizaron los patrones de cambio de cobertura y uso del terreno en el municipio de Zapotitlán, Puebla, así como las trayectorias de cambio, con base en las tasas de transformación identificadas, para analizar la importancia del decreto de la RBTC. Todo lo anterior tiene por objeto contar con información de utilidad para el desarrollo de proyectos de investigación científica, de planeación territorial y manejo integral de los ecosistemas (conservación de áreas prioritarias, aprovechamiento sustentable y recuperación de zonas degradadas), así como para establecer un sistema de monitoreo del CCUT, a nivel local.



Considerando la información expuesta, las preguntas abordadas fueron las siguientes: 1. ¿Cómo se distribuye la cobertura y el uso del terreno? 2. ¿Hubo un cambio de cobertura y uso del terreno en el municipio de Zapotitlán, Puebla en el período comprendido entre los años 1995 y 2018? 3) Si hubo un cambio en la cobertura y uso del terreno ¿cómo ha sido éste? ¿Qué patrones espaciales ha seguido? ¿Cuáles son los cambios más importantes? 4) ¿Qué trayectorias seguiría el CCUT en el municipio bajo dos escenarios: la derogación o el mantenimiento del Decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán?



3. Hipótesis

Desde hace al menos tres décadas, se ha planteado que el manejo inadecuado de los sistemas productivos en las zonas áridas y semiáridas del país (Dávila et al., 2002; Montaña y Monroy, 2000) y el desarrollo desequilibrado e inequitativo de los procesos de uso y manejo de los recursos naturales (Breceda et al., 2012; Casas et al., 2008; Velasco-Molina, 1991), han generado problemas ambientales sociales y económicos, arriesgando la integridad de la diversidad biológica y cultural, que son los elementos que sostienen los procesos productivos (Breceda et al., 2012; Duraisamy et al., 2018; Hole, 2009; Zaffar et al., 2005). Con base en esta premisa, y dado que no existe información del cambio de cobertura y uso del terreno para el municipio de Zapotitlán, se plantean las siguientes hipótesis:

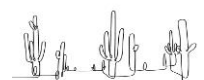
1. Dado que el establecimiento de las áreas naturales protegidas (ANPs) presupone el mantenimiento y/o la recuperación de la cobertura vegetal dentro de la zona correspondiente a dichas áreas, el municipio de Zapotitlán, Puebla presenta una superficie mayor o igual de cobertura vegetal natural en la actualidad, que antes del decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán.
2. Debido a que las zonas de producción agrícola se encuentran establecidas en las áreas más bajas, de menor pendiente y cercanas a los centros urbanos, las clases de cobertura vegetal natural más afectadas serían el izotal, el matorral espinoso, el mezquital y la tetechera, ya que se encuentran intercaladas con los espacios de influencia antrópica; por lo que presentarían mayores superficies de cambio debido a los procesos de conversión de la cobertura del terreno.
3. La modelación de los escenarios del CCUT es un instrumento útil para estimar las trayectorias de los cambios, y dado que los decretos de las ANPs tienen como uno de sus objetivos disminuir la pérdida de cobertura vegetal natural a lo largo del tiempo, en un escenario hipotético en el que el Decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán fuera derogado, la tendencia del CCUT en el municipio sería hacia la disminución de la superficie de las clases de cobertura vegetal natural y el incremento de las zonas agrícolas, los asentamientos humanos y las zonas sin cobertura.



4. Objetivos

Partiendo de la información y de las preguntas previas, esta investigación buscó de manera general, identificar y modelar los patrones de cambio de cobertura y uso del terreno en el territorio correspondiente al municipio de Zapotitlán, Puebla, en el período transcurrido entre 1995 y 2018; así como discutir las causas que lo determinaron y analizar las trayectorias de los cambios con base en las tasas de transformación identificadas. De acuerdo con lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Mostrar la distribución actual de la cobertura vegetal y el uso que se le da al terreno (CVUT) en el municipio.
2. Analizar y modelar los patrones espaciales de cambio en la cobertura y uso del terreno, entre 1995 y 2018, con la finalidad de identificar las trayectorias de los cambios, a partir del decreto de la Reserva de la Biósfera.
3. Localizar espacialmente las áreas en donde se registren los tipos de cambio más importantes.
4. Discutir las causas que se relacionan con el CCUT.



5. Estrategia Metodológica

5.1. Área de estudio

El municipio de Zapotitlán, Puebla se localiza en la parte sureste del estado de Puebla, al centro-sur de México, entre los 18°07'18" y 18°26'00" N y los 97°19'24" y 97°39'06" O (Figura 1). Colinda al norte con Tehuacán, al oriente con San Gabriel Chilac, San José Miahuatlán, al sur con Caltepec y al poniente con Atexcal y el estado de Oaxaca. Tiene una superficie de 431.49 km².

El clima predominante es del tipo seco con régimen de lluvias de verano (BSohw"(w)(e)g), con una temperatura media anual entre 17.6 y 23.7°C y una oscilación térmica que varía entre 5 y 7° (García, 2004). La precipitación media anual registrada en el área es de 412 mm (Muñoz et al., 2007) y pertenece a dos regiones geomorfológicas: el noreste que es parte del Valle de Tehuacán y el resto que pertenece a la sierra de Zapotitlán.

Fisiográficamente, la zona es compleja y variable, como consecuencia del origen y antigüedad del área (Muñoz et al., 2008; Valiente-Banuet et al., 2000). El relieve es producto de la acción de múltiples procesos geológicos como los plegamientos, el tectonismo regional y la acción erosiva remontante, así como de las variaciones climáticas y la sucesión de ambientes en el pasado, que se reflejan en la variación altitudinal (1380 a los 2580 msnm), en las fluctuaciones de las pendientes y en la diversidad de geoformas (laderas de montaña y colinas, elevaciones aisladas, piedemontes, escarpes, planicies aluviales) (López et al., 2003; Muñoz et al., 2007; Valiente-Banuet et al., 2000). La litología superficial está dominada por asociaciones de rocas sedimentarias, como calizas, lutitas, conglomerados y areniscas (Muñoz et al., 2007; Valiente-Banuet et al., 2000), con cuatro grupos de suelo, Leptosoles, Regosoles, Fluvisoles y Calcisoles (Muñoz et al., 2007).

En su mayor parte, la zona de estudio pertenece a la Región Hidrológica RH28 de la cuenca del Papaloapan, sólo el extremo suroeste es parte de la cuenca del Balsas (Muñoz et al., 2007). Numerosos arroyos intermitentes se concentran en un cauce principal al centro-este llamado Agua el Gavilán, principal afluente del río Zapotitlán, que se une al río Tehuacán y forman el río Salado, uno de los principales afluentes del Papaloapan. En el extremo sur están

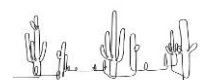


los arroyos Acatepec y Las Manzanas, que son afluentes del río Acatlán (INEGI, 2013a), en la cuenca hidrográfica del Balsas.

La vegetación se considera como un relictos del matorral xerófilo que alguna vez predominó en todo el Valle de Tehuacán, destacando que 13.9% del total de las especies son endémicas (Dávila et al., 2002). Debido a la heterogeneidad ambiental de la zona, la agrupación de las diferentes especies permite que haya variantes en las asociaciones vegetales, entre las que dominan los bosques de cactáceas columnares, como la Tetechera de *Cephalocereus tetetzo* y el Cardonal de *C. columna-trajani*; el Mezquital de *Prosopis laevigata*, el Mexical y la Selva Baja Caducifolia (Valiente-Banuet et al., 2000, 2009).

De acuerdo con Arias-Toledo et al. (2000), Paredes-Flores et al. (2007) y Sánchez (2007), los usos del terreno registrados se pueden clasificar en: 1) agrícola de temporal anual y de riego, 2) sistemas agroforestales, agroganaderos y agroindustriales (granjas avícolas), 3) uso ganadero de caprinos, equinos y bovinos, 4) uso forestal no maderable, 5) uso de extracción, incluyendo el minero, con explotación de yacimientos de ónix, de recursos pétreos, de áreas dedicadas a la producción de sal artesanal en las salinas (Vallejo et al., 2015), y del suelo arcilloso de Los Reyes Metzontla, para la elaboración de artesanías de barro con técnicas prehispánicas (Arias-Toledo et al., 2000), y 6) uso urbano, con la presencia de vivienda con sistemas de traspatio, para autosubsistencia e infraestructura urbana.

En lo que respecta al perfil sociodemográfico, el municipio cuenta con 8,220 habitantes, siendo 4,508 mujeres y 3,712 hombres, con una densidad de población de 18.78 habitantes por km², con una relación de 1.215 mujeres por cada hombre. Existe una tasa de cambio poblacional considerable, pues se identifica una disminución de personas del género masculino en un 24.35% y un 6.14% del femenino, del 2000 al 2010. Este hecho está relacionado con la alta tasa de migración, ocupando el puesto 36 de los 217 municipios de Puebla (INEGI, 2010a). Relacionado con lo anterior, el índice de marginación es de 0.61, que en escala del 0 al 100 es de 34.5, por lo cual se considera alto, ya que ocupa el lugar 71 en el estado (CONAPO, 2011).



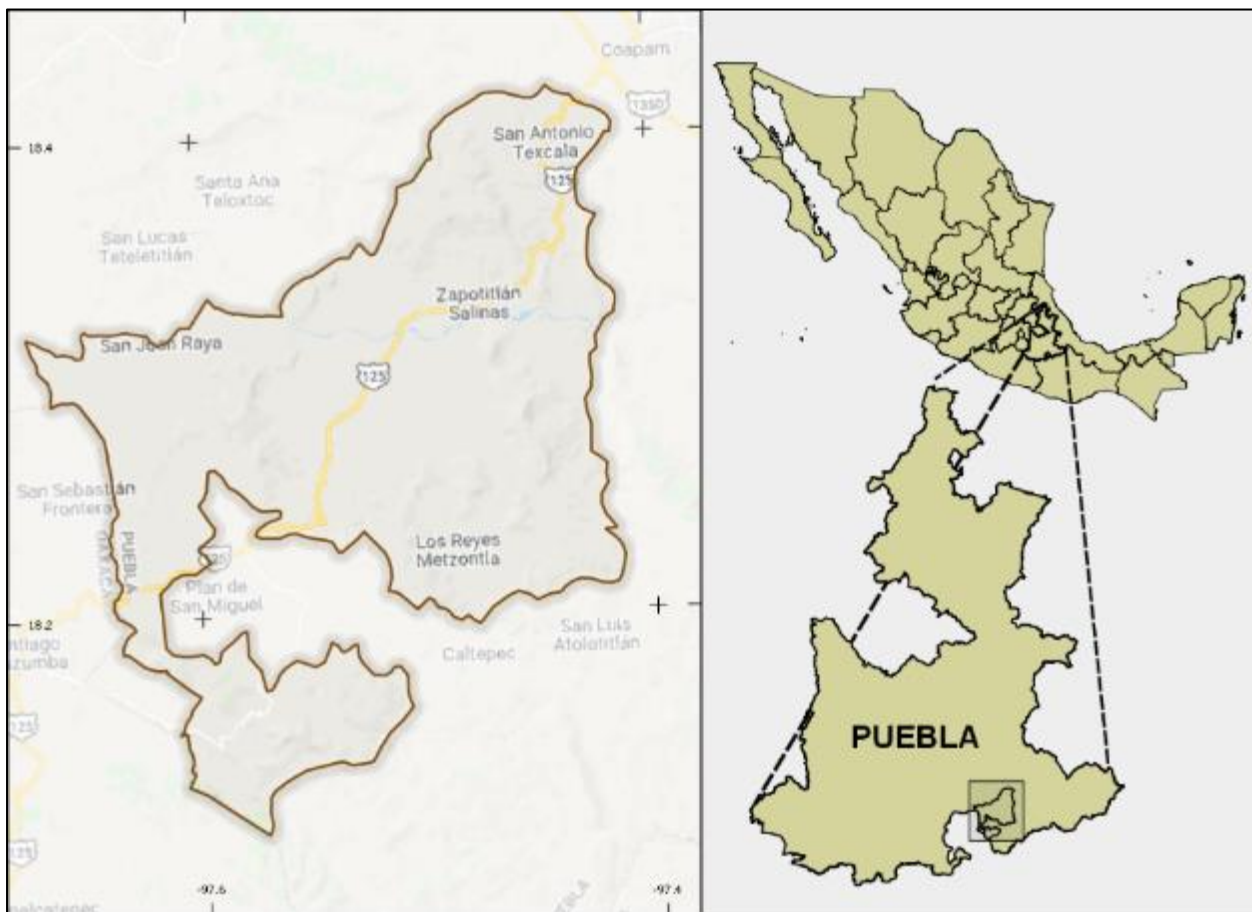


Figura 1. Localización del municipio de Zapotitlán, Puebla



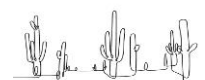
5.2. Materiales y Métodos

5.2.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT)

Para cubrir esta etapa, se diseñó una ruta de tres pasos: i) manejo de la base de datos, ii) generación de la leyenda y iii) la clasificación de la imagen de satélite, para generar el mapa de cobertura vegetal y uso actual, a nivel municipal (Figura 2).

5.2.1.1. Manejo de la base de datos. Se trabajó con un registro de 15,221 datos florísticos (Téllez, 2019), el cual fue depurado, con la finalidad de eliminar registros duplicados, mal georreferenciados, o que carecieran de la información sobre el tipo de asociación vegetal. Se obtuvieron 322 sitios distribuidos en la zona de estudio, a los que se les adicionaron 198 puntos de verificación en campo. Esta información fue reclasificada en el programa ArcMap 10.5, para generar las capas vectoriales de los sitios registrados en cada uno de los tipos de CVUT y crear los campos de entrenamiento para llevar a cabo la clasificación. Adicionalmente, se compiló una base de datos de 85,000 registros (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) (CONABIO, 2020), que incluye los 15,221 de Téllez (2019), con la que se elaboró un listado de especies vegetales vasculares por tipo de CVUT (Hernández-Moreno et al., en prensa), identificados para Zapotitlán, mediante el cruce de las bases de datos. Los nombres de las especies fueron corregidos y/o actualizados de acuerdo con Villaseñor (2016) y <https://www.theplantlist.kew.org> (consultada en julio 2020).

5.2.1.2. Generación de la leyenda. Se construyó una propuesta conformada por 17 clases de CVUT. El sistema de clasificación empleado para nombrar las clases de cobertura vegetal es el propuesto por Valiente-Banuet et al. (2009), quienes definen las asociaciones vegetales para el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, con base en criterios estructurales, fisonómicos y de la composición de especies. Sin embargo, la heterogeneidad ambiental del sitio de trabajo y la dificultad de acceso y muestreo en algunos sitios, no permitieron disponer de información suficiente, por lo que las clases Tetechera de *C. tetezo* y la de *C. mezcalaensis* y *C. macrocephala*, se integraron como una sola clase denominada Tetechera de *Cephalocereus tetezo*. Para los usos del terreno se utilizó la clasificación propuesta por el INEGI (2017a). La descripción y caracterización de cada tipo de CVUT se hizo integrando las propuestas por diferentes autores (INEGI, 2017a; Miranda y Hernández-X, 1963; Valiente-Banuet et al., 2009); además, se identificaron elementos conspicuos

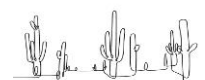


del paisaje, tales como el relieve y el tipo de roca en el que se establecen. Se utilizaron los mapas digitales en formato vectorial de topografía, en escala 1:50,000 (INEGI, 2013a) y geología, en escala 1:250,000 (INEGI, 2002).

5.2.1.3. Clasificación de la imagen de satélite. La clasificación se realizó mediante técnicas no paramétricas de aprendizaje automático (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014), del programa de código abierto R versión 4.0 (Teme RDC, 2020), utilizando como insumo una imagen de satélite Landsat 8-OLI (30 metros de resolución espacial) de febrero de 2018, obtenida de la plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). El proceso de clasificación se desarrolló en cuatro pasos: i) la preparación y visualización de datos, ii) la evaluación y selección del modelo óptimo, que produjeron una primera clasificación de la CVUT, iii) la post-clasificación y, iv) la evaluación del mapa final.

En la primera, se generó una imagen multibanda (bandas 1 a 7), en la cual se crearon los campos de entrenamiento usando diversos compuestos RGB (Franco, 2017). Los campos de entrenamiento se dividieron en subconjuntos de entrenamiento y validación, en una proporción 80:20; es decir, el 80% de las áreas de entrenamiento se utilizaron para revisar el desempeño inicial del modelo y el 20% para la evaluación final de la exactitud (Kamusoko, 2019). Una vez seleccionadas las clases finales y los insumos espectrales, se configuraron los parámetros de ajuste de los modelos de aprendizaje, el método de remuestreo, el número de iteraciones y de repeticiones que indica el número de pliegues o subconjuntos, para realizar la validación cruzada (Kamusoko, 2019). Para evitar problemas de sobreajuste, se seleccionaron los modelos óptimos, tomando en cuenta los valores de exactitud total y el coeficiente de Kappa (Congalton y Green, 2019) y se estimó su rendimiento.

En la segunda fase, se evaluaron cinco diferentes modelos de aprendizaje automático: Bosques Aleatorios (RF, por sus siglas en inglés), máquina de soporte de vectores (SVM), funciones de particionamiento y regresión (R-part), vecino más cercano (KNN) y redes neurales artificiales (ANN). Como datos auxiliares se utilizaron (Ghosh et al., 2014), las 7 bandas de la imagen LANDSAT, las variables topográficas altitud y orientación, extraídas a partir del modelo digital de elevación (SRTM, 2018, resolución de 30 m) y las variables climáticas incluyendo la precipitación anual y temperatura máxima anual (Cuervo-Robayo et al., 2014),



que fueron reinterpoladas a 30 m de resolución con el programa ANUCLIM 6.1 (Xu y Hutchinson, 2013). En esta primera clasificación, el modelo resultante de las dos primeras etapas de trabajo fue seleccionado mediante el criterio que emplean Pereira e Silva et al. (2020) para los valores de exactitud total y coeficiente de Kappa: pobre: <0, leve: 0-0.2, justo: 0.21-0.4, moderado: 0.41-0.6, substancial: 0.61-0.8, casi perfecto: 0.81-1.0.

En la post-clasificación, en primer lugar, se separaron las coberturas agregadas en la etapa de preparación y visualización, utilizando el registro geográfico de las especies más representativas de cada clase y modelando su distribución potencial (MDP). Se generaron diferentes modelos candidatos, mediante el algoritmo de Máxima Entropía (Phillips et al., 2006) y se seleccionó el de mejor desempeño con base en los criterios ROC parcial y tasas de omisión, utilizando el paquete 'kuenm' (Cobos et al., 2019). Para realizar los MDP se utilizaron las variables bioclimáticas elaboradas por Cuervo-Robayo et al. (2014), interpoladas a 30 m, empleando el mismo método de la etapa anterior. Teniendo los MDP, se asignó la categoría correspondiente a cada pixel de las clases agregadas, comparando los mapas de las diferentes especies, y asignándoles el tipo de cobertura vegetal en función del valor máximo de probabilidad. Posteriormente se revisaron y mejoraron las coberturas de las zonas agrícolas y los asentamientos humanos, comparándolas con las imágenes de alta resolución de la plataforma Google Earth Pro y la base de datos Open Street Map, (www.openstreetmap.org), ambos de 2020. El mapa fue generalizado, aplicando un filtro espacial con un umbral de 6 píxeles (todos los parches con menos de 6 píxeles, se generalizaron) y con una conexión de pixel de 4, en una ventana de 3x3 (Aldalur y Santamaría, 2002), para obtener el mapa final de la cobertura vegetal y uso actual de Zapotitlán, Puebla, cuya escala fue determinada de acuerdo con Priego-Santander et al. (2010).

La última etapa consistió en la evaluación del mapa final, mediante la construcción de una matriz de confusión (Congalton y Green, 2019), en la cual se compararon las clases resultantes en la post-clasificación y las obtenidas a partir de los puntos de verificación. Se definieron 850 puntos de manera aleatoria, buscando alcanzar una representatividad de las 17 clases de CVUT, de acuerdo con lo sugerido por Lillesand et al. (2004). La asignación de la clase correspondiente a cada sitio de verificación se realizó comparando su área de influencia con la de los sitios de entrenamiento, utilizando el algoritmo de región incremental automático,



disponible con el complemento de Semi-Automatic-Plugin Classification (Congedo, 2016) en el software QGIS 3.10. Un total de 652 puntos fueron discriminados con dicho algoritmo, los 198 restantes se identificaron en campo entre 2017 y 2018. A partir de la verificación directa en el terreno, aplicando el conocimiento experto, tanto de los autores, como de los pobladores locales. La calidad final del mapa de CVUT se evaluó mediante los criterios de exactitud y de coeficiente de Kappa empleados en la segunda etapa, y con los valores de sensibilidad (exactitud del usuario) y especificidad (Congalton y Green, 2019), para evaluar el desempeño individual de cada clase de CVUT. Este mapa fue la base con para elaborar los mapas de CVUT de 1995 y 2007, y para realizar el análisis espacio-temporal del cambio de cobertura y uso del terreno (Leija et al., 2016).

5.2.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) de 1995 y 2007

Los mapas de CVUT de 1995 (t1) y 2007 (t2), se elaboraron a partir del mapa digital de CVUT de 2018 (t3) en formato vectorial. Para ello, el mapa del t3 se sobrepuso en un mosaico de ortofotos digitales de 2 metros de resolución de 1995 (INEGI, 1999), utilizando el programa QGIS 3.10 y se realizó una interpretación visual, con la que se verificó la coincidencia espacial entre las clases de CVUT, entre ambas coberturas, t1 vs t3. Los sitios en donde no hubo coincidencia se modificaron, según la clase que le correspondiera (Leija et al., 2016). La verificación de la asignación de la clase de CVUT, se llevó a cabo con los registros de la base de datos compilada para el proyecto (CONABIO, 2020; Téllez, 2019). El mismo procedimiento se siguió para la elaboración del mapa de CVUT de 2007, comparando el mapa digital de 2018 (t3), con una imagen de alta resolución de Google Earth Pro de 2007 (t2) (Figura 2).

5.2.3. Identificación y análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT)

5.2.3.1. Análisis exploratorio. Se llevó a cabo un análisis exploratorio de las tasas de CCUT total y anual registradas para el municipio (Anexo 1), con base en la cartografía digital en formato vectorial de uso de suelo y vegetación, en escala 1:250 000, en sus series I a VI (INEGI, 1992, 2001, 2003, 2010b, 2013b, 2017) . Esto permitió identificar la tendencia de los cambios en el período 1985 – 2014.



5.2.3.2. Análisis del cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT). Para realizar este análisis se sobrepusieron los polígonos del mapa de CVUT de 2018 (t3), a las ortofotos digitales de 1995 (INEGI, 1999) (t1) y a la imagen de Google Earth de 2007 (t2) . Mediante un análisis visual en la pantalla, se modificaron los límites de las clases de CVUT (Leija et al., 2016), tal como se realizó en el apartado anterior. Este método minimiza los errores derivados de los falsos cambios en la clasificación de los mapas (clasificación, etiquetado y delimitación de polígonos) (Mas et al., 2005). La confiabilidad de los mapas obtenidos para 1995 y 2007, se basó en los criterios de exactitud tomados para la elaboración del mapa de 2018 (Rodríguez-Galiano y Chica-Olmo, 2012), de acuerdo con el procedimiento expuesto en el apartado de clasificación y evaluación del mapa final. La identificación espacial y cuantificación de las áreas de cambio se obtuvieron por sobreposición de los mapas de 1995-2007 y 2007-2018 (Leija et al., 2016). La tasa de cambios se obtuvo mediante el programa de código libre DINAMICA EGO (<https://csr.ufmg.br/dinamica/>) (Rodrigues y Soares-Filho, 2018) y se elaboraron los mapas para identificar la localización de los cambios de cobertura y uso del terreno (CCUT) (Figura 2).

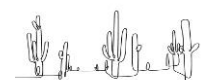
5.2.3.3. Modelación del cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT). Para analizar la tendencia del CCUT, se modelaron las trayectorias del mismo, considerando dos escenarios, uno previo y otro posterior al decreto de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán Cuicatlán. Para ello se empleó el programa de código libre *DINAMICA EGO* (<https://csr.ufmg.br/dinamica/>) (Rodrigues y Soares-Filho, 2018). Este programa modela escenarios futuros a partir de las tendencias identificadas en un análisis previo, considerando los procesos espaciales y temporales relacionados con el CCUT. Se basa en algoritmos de autómatas celulares y los pesos de evidencia de distintas variables biofísicas y socioeconómicas identificadas como factores causales de la transformación (Leija et al., 2016; Soares-Filho et al., 2009), generando modelos dinámicos espacialmente explícitos, con un enfoque inductivo, basado en patrones (Mas et al., 2014a). El programa utiliza mapas de probabilidad de transición que se basan en la ponderación de la evidencia y métodos de algoritmos genéticos. Dichos mapas simulan la dinámica del paisaje utilizando matrices de cadena de Markov para determinar la cantidad de cambio y el enfoque de autómatas celulares para reproducir los patrones espaciales (Mas et al., 2014a). El método de pesos de evidencia que emplea, permite generar un mapa de cambio potencial con base en las variables explicativas e integrar el



conocimiento experto, con el fin de visualizar o modificar los valores de relación entre las variables (Leija et al., 2016).

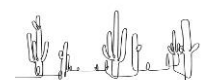
Para realizar los modelos del CCUT se estructuró un base de datos cartográfica en formato raster, que incluye los mapas de CVUT que fueron previamente generados en los tres tiempos (1995, 2007 y 2018), así como las variables relacionadas con el CCUT, que se homologaron en cuanto a cobertura espacial y georreferencias, utilizando el programa QGIS 3.10. Con esta información se generó un archivo multicapa. Las variables explicativas se seleccionaron tomando en consideración lo planteado por CONANP y FMCN (2003) y por Figueroa et al. (2009), así como el conocimiento que se adquirió de la zona de estudio mediante los recorridos de campo que se hicieron para levantar los puntos de verificación de las clases de CVUT. A partir de ello se identificó la influencia que podrían tener algunas variables en las transiciones entre clases de CVUT (Quiroz, 2009). Las variables empleadas para modelar el CCUT fueron las distancias a los caminos y carreteras (pavimentados y terracerías), a los asentamientos humanos, a las zonas agrícolas y a las corrientes de agua perennes. La información base se obtuvo de la carta topográfica digital en escala 1:50 000 (INEGI, 2013a). Las demás variables incluidas fueron la tenencia de la tierra, la cual se obtuvo del portal de Datos Abiertos del Registro Agrario Nacional (<https://www.gob.mx/ran#709>), que ofrece los archivos digitales con la delimitación de los núcleos agrarios y las tierras de uso común; los tipos de suelo (INEGI, 2007) y, la altitud y la pendiente, obtenidos a partir del Modelo Digital de Elevación (30 metros de resolución espacial) (SRTM, 2018).

Después de que las variables se integraron al modelo, se analizó su influencia en los cambios detectados y su representatividad, generando un mapa de probabilidad de cambio. La influencia de las variables se calculó mediante los pesos de evidencia que se derivan, obteniendo la probabilidad de que ocurra un evento (cambio) (Leija et al., 2016). Los pesos de evidencia se calcularon para cada intervalo correspondiente a cada variable, para cada transición estimada (Quiroz, 2009). Para verificar la no correlación entre las variables se aplicaron los estadísticos de Cramer y el de la información de incertidumbre-conjunta (Quiroz, 2009; Soares-Filho et al., 2009). Debido a que la tenencia de la tierra y los tipos de suelo presentaron una alta correlación (>0.5) (Mas y Flamenco-Sandoval, 2011; Mas et al., 2014a), se eliminó la primera variable del modelo, considerando que el tipo de suelo puede tener una mayor influencia en el CCUT.



Posteriormente se calcularon las matrices de cambio, utilizando los mapas de CVUT de t1 (1995) y t2 (2007), con el propósito de abordar el escenario previo al decreto la Reserva de la Biósfera Tehuacán Cuicatlán (RBTC). Con ello se calcularon las tasas de transición neta y anual y se evaluaron las variables. El mismo procedimiento se llevó a cabo para modelar los cambios entre t2 (2007) y t3 (2018), con el fin de estimar las tasas de cambio neta y anual en el período posterior al decreto. Para la modelación de los escenarios, se empleó la función que simula los cambios en forma expansiva (“*expander*”), que agrega áreas adyacentes a las clases preexistentes. Para esto, se tomaron en cuenta el promedio y la varianza del tamaño de las áreas de expansión (Quiroz, 2009). Los mapas de probabilidad de cambio generados fueron empleados para construir los escenarios de las superficies que podrían transformarse año tras año, con base en las tasas de cambio previamente calculadas (Leija et al., 2016; Soares-Filho et al., 2009), asumiendo dos escenarios: 1) la derogación del decreto de la RBTC (D-DR), a partir de 2018 (fecha del mapa de CVUT actual), y 2) el mantenimiento del decreto de la RBTC (M-DR) (Figura 2). Con esto se obtuvieron mapas con la proyección de las trayectorias de los cambios a 2024 y 2030, en ambos escenarios.

La validación de los diferentes escenarios modelados se realizó mediante la aplicación de una prueba de similitud difusa (Hagen 2003; Hagen-Zanker et al. 2005, 2009), por medio de la cual se compararon los mapas simulados (mantenimiento, M-DR y derogación del Decreto D-DR de la RBTC) con el mapa de referencia (2018). El método específico que se empleó fue la modificación realizada por Soares Filho et al. (2009), al método de Hagen (2003), en el cual se hace una comparativa sobre las diferencias encontradas entre los mapas evaluados. Partiendo del supuesto de que cada pixel está influenciado por sí mismo, y en menor medida por las celdas en su proximidad, en el presente trabajo se adoptó una función de decaimiento constante, que fue calculada poniendo a prueba diferentes ventanas de amplitud con tamaños de pixel de 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 y 11x11. Los resultados posibles a obtener oscilan entre un valor de 0 a 1, siendo los mapas con valores más cercanos a 1, aquellos con mayor similitud entre sí. De acuerdo con Macedo et al. (2013), los valores del índice por encima de 0.4 en ventanas de 3x3 y 5x5 son indicadores de un nivel óptimo de compatibilidad entre el escenario simulado y el real (mapa de referencia).



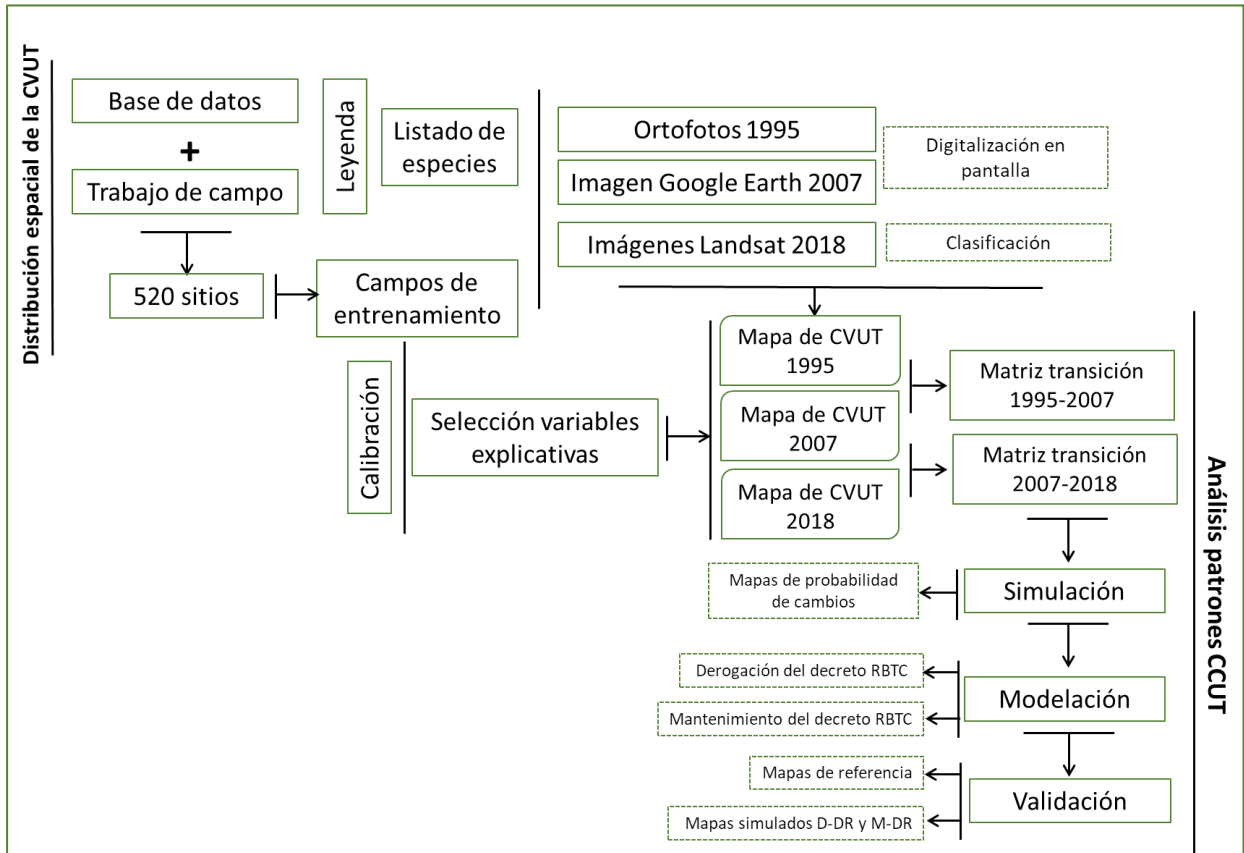
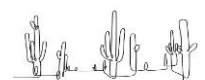


Figura 2. Diagrama metodológico. D-DR=Derogación del Decreto de la Reserva; M-DR= Mantenimiento del Decreto; RBTC=Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán



6. Resultados

6.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT)

6.1.1. Base de datos. La base de datos que se utilizó para generar los 160 campos de entrenamiento para clasificar la imagen cuenta con información de la composición florística y la distribución de la vegetación y uso del terreno para los 520 sitios. Con esa base de datos y la compilada a partir de otras fuentes de información, se generó un listado de especies por clase de CVUT que incluye 137 familias y 1211 especies de plantas vasculares para el municipio (Hernández-Moreno et al., en prensa).

6.1.2. Leyenda. A partir del análisis de la información de las bases de datos, se generó la leyenda que consta de tres niveles jerárquicos. El nivel 1 discrimina sólo dos clases: cobertura vegetal natural y usos del terreno u otros elementos. En el nivel 2 se presenta la equivalencia con los tipos de uso del suelo y vegetación, resaltando que algunos de ellos agregan de tres a cuatro clases del siguiente nivel, como por ejemplo, los matorrales desértico micrófilo y crasicaule, debido a que se usa una clasificación general, que identifica grandes unidades de vegetación, en función de su afinidad ecológica y fisonómica. En el 3 se presentan las clases de CV a nivel de asociación vegetal y los tipos de uso del terreno resultantes de la clasificación, obteniéndose 17 categorías, de las cuales 13 son de cobertura vegetal natural, dos tipos de uso del terreno (agrícola y urbano), y las otras dos se refieren a las áreas sin CV (Cuadro 1).



Cuadro 1. Leyenda jerarquizada de CUT en tres niveles. El nivel 1 distingue entre vegetación natural y usos del terreno. El nivel 2 muestra el sistema de clasificación de los tipos de uso del suelo y vegetación (INEGI, 2107a). El nivel 3 presenta las clases empleadas para elaborar el mapa de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) según Valiente-Banuet et al. (2009)

Clase	CVUT (Clave)	Descripción
Cobertura Vegetal Natural		
Bosque de encino		
1	Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i> (BQm)	En barrancas y laderas, en zona de contacto de calizas y lutitas con areniscas y de areniscas con conglomerados, entre 1700 y 1800 m s.n.m. La especie dominante es un árbol de 3-12 m, caducifolio.
Matorral desértico micrófilo		
2	Matorral espinoso con espinas laterales (MEel)	En piedemonte y planicies con lutitas y areniscas, ca. de 1500 m s.n.m. Dominan arbustos espinosos, caducifolios.
3	Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i> (M_Ep)	En laderas de lutitas con areniscas y afloramientos de calizas, de 1600 a 1800 m de altitud. La especie dominante presenta individuos de hasta 2.5 m.
4	Matorral cras-irosulifolio de <i>Dasyliion</i> y <i>Agave</i> (MCR_DA)	En laderas y cimas de los cerros formados por calizas, de 1700 a 1900 m. s.n.m. Predominan plantas con hojas en forma de roseta, con o sin tallos evidentes.
Matorral crasicaule		
5	Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i> (Car_Cct)	En laderas formadas por lutitas con areniscas, entre 1500 y 1700 m de altitud. La especie dominante alcanza los 10 m, con tallo monopódico.
6	Cardonal de <i>C. fulviceps</i> (Car_Cf)	En mesas, lomas, colinas y laderas en zonas de contacto de lutitas y areniscas y conglomerados con calizas, de 1700-1900 m. s.n.m. La especie dominante alcanza hasta 10 m en el tronco principal, a partir del cual ramifica profusamente.
7	Tetechera de <i>C. tetetzo</i> (Tet_Ct)	En lomeríos, laderas, pie de monte y planicies con lutitas y areniscas y ocasionalmente calizas o conglomerados, entre 700 y 1500 m de altitud. La especie dominante es una cactácea columnar muy ramificada, de hasta 8 m.
8	Chichipera <i>Polaskia chichipe</i> (Ch_Pch)	En cerros y laderas formados por basalto con brecha volcánica, de 1700 a 1900 m. s.n.m. La especie dominante es un cactus arborescente, de 3 a 5 m, muy ramificado (27/103).
Matorral desértico rosetófilo		
9	Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i> (Iz_Bg)	En laderas, piedemonte y planicies con una alta diversidad litológica (calizas, conglomerados, lutitas y areniscas, esquistos, basaltos y brechas volcánicas), a 1600 m. s.n.m. La especie dominante tiene la base leñosa muy ensanchada, de hasta 2 m de diámetro.
10	Izotal de <i>Yucca periculosa</i> (Iz_Yp)	En laderas, piedemonte y planicies formados por lutitas y areniscas, hasta los 1700 m. s.n.m. La especie dominante, de hasta 4 m, es ramificada, con hojas sin espinas laterales y una espina terminal.
Selva baja caducifolia		
11	Selva baja caducifolia (SBC)	En laderas altas y cimas de los cerros formados por lutitas y areniscas, desde los 1700 m. s.n.m. Predominan especies arbóreas caducifolias, de hasta 10 m.
Bosque de mezquite		
12	Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i> (Mez_Pl)	Sobre un sistema de terrazas fluviales altamente fragmentadas, entre 1450 y 1550 m de altitud. La especie dominante es un árbol perennifolio, de 2-7 m; una alta proporción de las especies con espinas.



Chaparral		
13	Mexical (Mex)	En laderas con lutitas y areniscas o calizas; escarpes con areniscas y conglomerados, de 1900 a 2400 m. s.n.m. Constituido por arbustos perennifolios, con hojas esclerófilas y que no sobrepasan los 2 m.
Uso del Terreno u otros elementos		
Área agrícola		
14	Zona agrícola (ZA)	Áreas de producción de cultivos que son obtenidos para su utilización por el ser humano, ya sea como alimentos, forrajes, ornamental, o industrial.
Asentamientos humanos		
15	Asentamientos humanos (AH)	Sitio específico donde se establecen viviendas y otras estructuras, en donde se llevan a cabo las actividades sociales y económicas, así como vialidades.
Área desprovista de vegetación		
16	Sin cobertura (SC)	Comunidades vegetales no visibles o detectables. Incluye el cauce del río principal, bancos de material, salineras y sitios sin vegetación.
17	Sin cobertura, con suelo degradado (SC_sd)	Sitios desprovistos de vegetación en donde el suelo o la roca quedan expuestos.

6.1.3. Clasificación de imagen de satélite. Para el sensor utilizado, fue la banda 6 (1.566-1.651 μ m), en la que las clases de CVUT presentaron una respuesta espectral con mayor variabilidad, siendo 11 de las 17 clases, las que presentaron una mayor diferencia entre sí, mientras que las otras seis tuvieron una marcada similitud. Estas últimas se integraron en tres categorías, definidas por la agregación del matorral de *Echinocactus platyacanthus* con el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* (*Echinocactus-Dasyllirion*), el izotal de *Yucca periculosa* con el matorral espinoso con espinas laterales (*Yucca*-matorral espinoso) y la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* con la selva baja caducifolia (tetechera-selva baja). De este modo, en esta primera clasificación, quedaron definidas 14 categorías para su clasificación mediante los métodos de aprendizaje automatizado, siendo el de bosques aleatorios (RF) el que presentó un mejor desempeño, con un valor de exactitud total de 0.67 y de Kappa de 0.62 (Figura 3). Las variables que más contribuyeron al rendimiento del modelo, con más del 80% de importancia, fueron la banda 1 (azul profundo), la precipitación anual, la banda 4 (rojo), la orientación de las laderas y la banda 5 (infrarrojo cercano) (Figura 3).



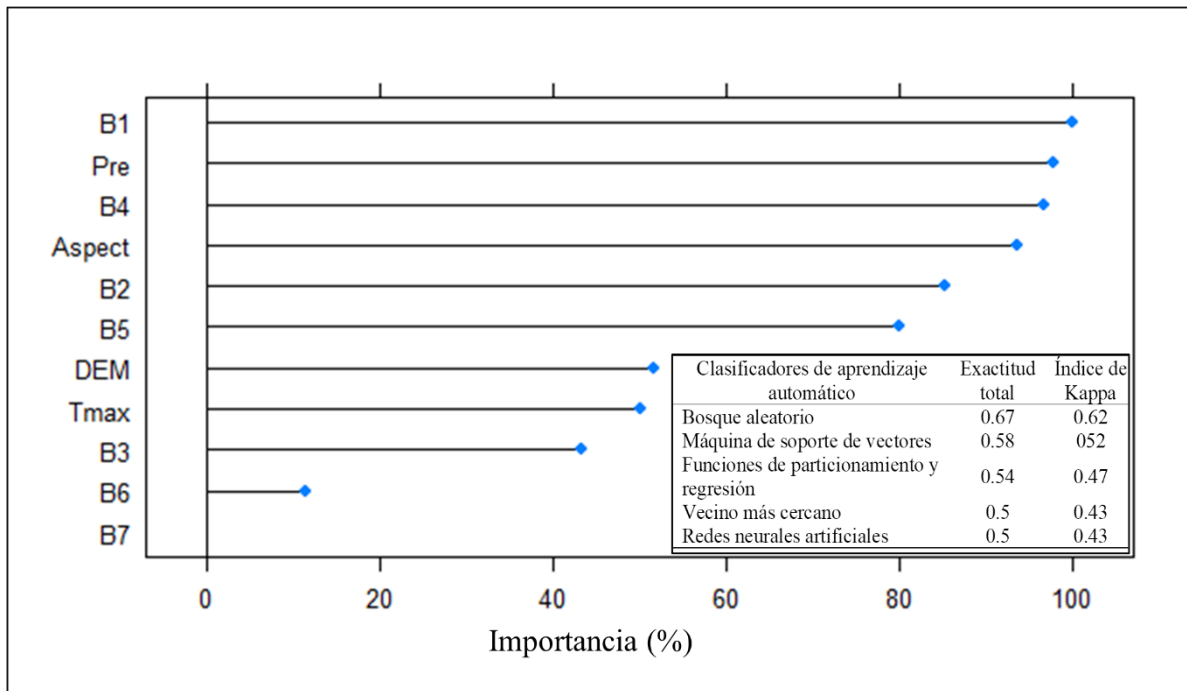
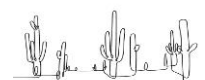


Figura 3. Porcentaje de importancia de las variables para el modelo de bosques aleatorios (B1 - B7, bandas 1 a 7 de la imagen Landsat 8; Pre, precipitación anual; Aspect, orientación de laderas; DEM, modelo digital de elevación; Tma, temperatura máxima promedio anual), indicando los valores de exactitud total y del índice de Kappa obtenidos para los clasificadores empleados en la etapa de evaluación y selección del modelo.

Los modelos de distribución potencial permitieron discriminar las clases agregadas, en la siguiente proporción de superficie: i) *Echinocactus-Dasyilirion*, en matorral de *Echinocactus platyacanthus* (42.6%) y matorral crasi-rosulifolio de *Dasyilirion* y *Agave* (57.5%), ii) *Yucca*-matorral espinoso, en izotal de *Yucca periculosa* (76%) y matorral espinoso con espinas laterales (24%) y iii) tetechera-selva baja, en tetechera de *Cephalocereus tetetzo* (97.4%) y selva baja caducifolia (2.6%). Por su parte, la revisión y mejoramiento con las imágenes en alta resolución y la plataforma de Open Street Map, incrementó las zonas agrícolas en un 57.2% y los asentamientos humanos en un 27%.

El producto principal de la clasificación automatizada y la post-clasificación, corresponde al mapa de la cobertura vegetal y uso actual del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla (Figura 4), con una escala del modelo de nivel 4 (máximo 1:50,000) y una unidad mínima de mapeo de 6.25 ha.



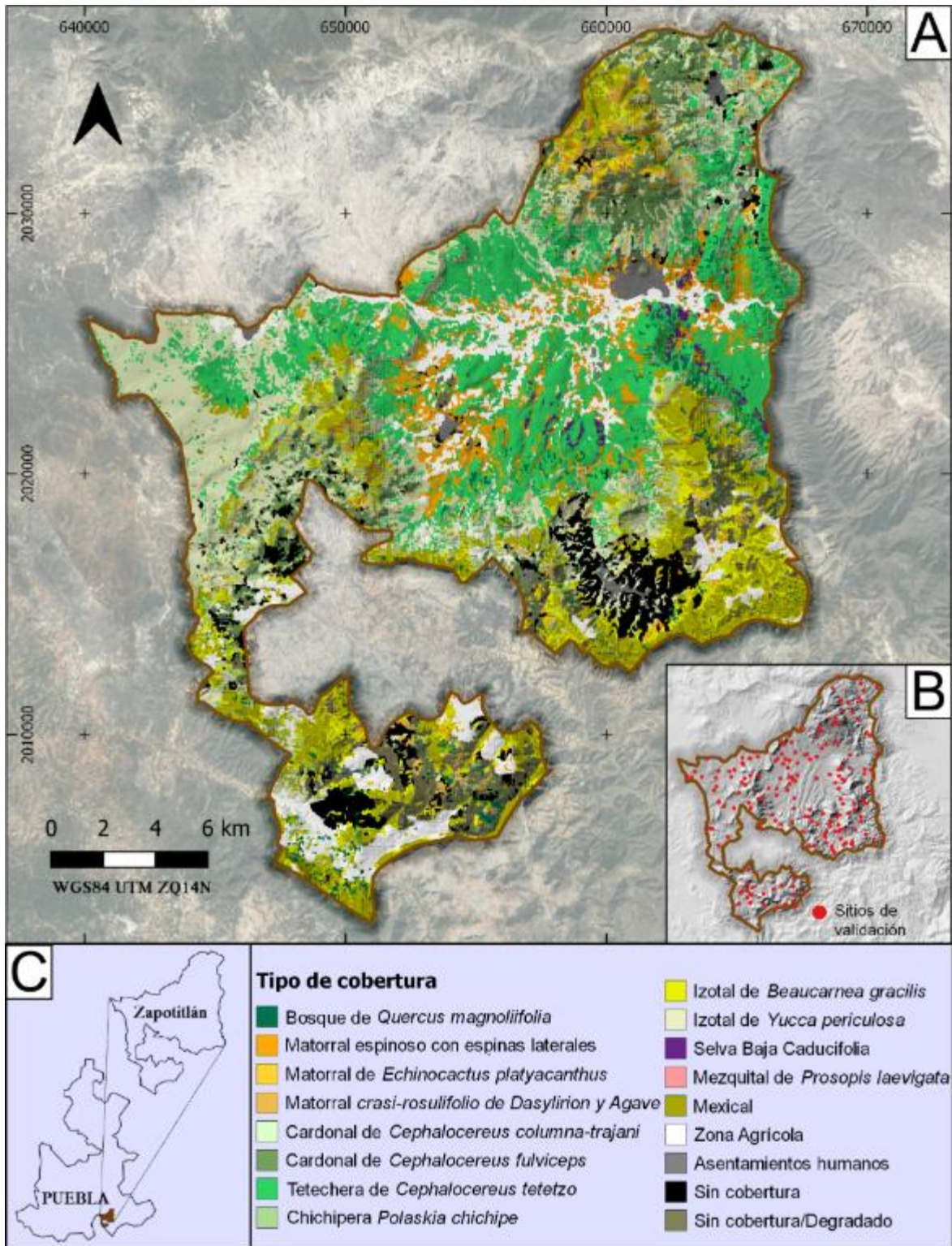
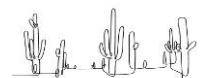


Figura 4. A) Cobertura vegetal y uso actual del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla. B) Mapa de puntos de verificación en campo. C) Ubicación del municipio en Puebla.



Se registró que el 79.7% de la zona (34,385.5 ha) presenta cobertura vegetal natural, el 10.1% (4,378 ha) carece de ésta y en el 8.9% (3,841.3 ha) se desarrollan actividades agrícolas. Para la cobertura vegetal natural se encontró que la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* es la clase dominante, cubriendo 21.2% del área y en ella se presentan 503 especies, seguida del izotal de *Yucca periculosa* (20.5% y 399 especies), el mexical (9.3%, 304) y el izotal de *Beaucarnea gracilis* (7.6%, 252). Las demás clases ocuparon cada una, menos del 6% del territorio cada una. Las zonas dedicadas a la producción agrícola registran la presencia de 457 especies, los asentamientos humanos cubren 1.3% del territorio, con 229 especies, y las zonas sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado, se distribuyen en 5.1% y 5% del área, presentando 248 y 237 especies, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Superficie (hectáreas y porcentaje) y número de familias y especies por clase de cobertura vegetal y uso actual del terreno.

No.	Nombre de la clase	Clave	Sup. (ha)	Sup. (%)	No. Fam	No. Esp
Cobertura vegetal natural						
1	Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i>	BQm	782.4	1.8	36	134
2	Matorral Espinoso con espinas laterales	MEel	2792.9	6.5	52	182
3	Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i>	M_Ep	450.6	1.0	26	55
4	Matorral crasi-rosulifolio de <i>Dasyliirion</i> y <i>Agave</i>	MCR_DA	606.8	1.4	41	107
5	Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i>	Car_Cct	417.4	1.0	30	95
6	Cardonal de <i>Cephalocereus fulviceps</i>	Car_Cf	2544	5.9	54	231
7	Tetechera de <i>Cephalocereus tetetzo</i>	Tet_Ct	9129	21.2	78	503
8	Chichipera <i>Polaskia chichipe</i>	Ch_Pch	1248.2	2.9	27	103
9	Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i>	Iz_Bg	3289	7.6	61	252
10	Izotal de <i>Yucca periculosa</i>	Iz_Yp	8852.9	20.5	62	399
11	Selva Baja Caducifolia	SBC	241.7	0.6	28	111
12	Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i>	Mez_Pl	23	0.1	36	114
13	Mexical	Mex	4005	9.3	63	304
Uso del terreno y otros elementos						
14	Zona Agrícola	ZA	3841	8.9	91	457
15	Asentamientos Humanos	AH	544	1.3	60	229
16	Sin Cobertura	SC	2204.9	5.1	53	248
17	Sin Cobertura con suelo degradado	SC_sd	2173	5	45	237

La diversidad de clases de CVUT cartografiadas para Zapotitlán se ilustran en la Figura 5, así como el patrón de distribución que siguen (Figura 6).



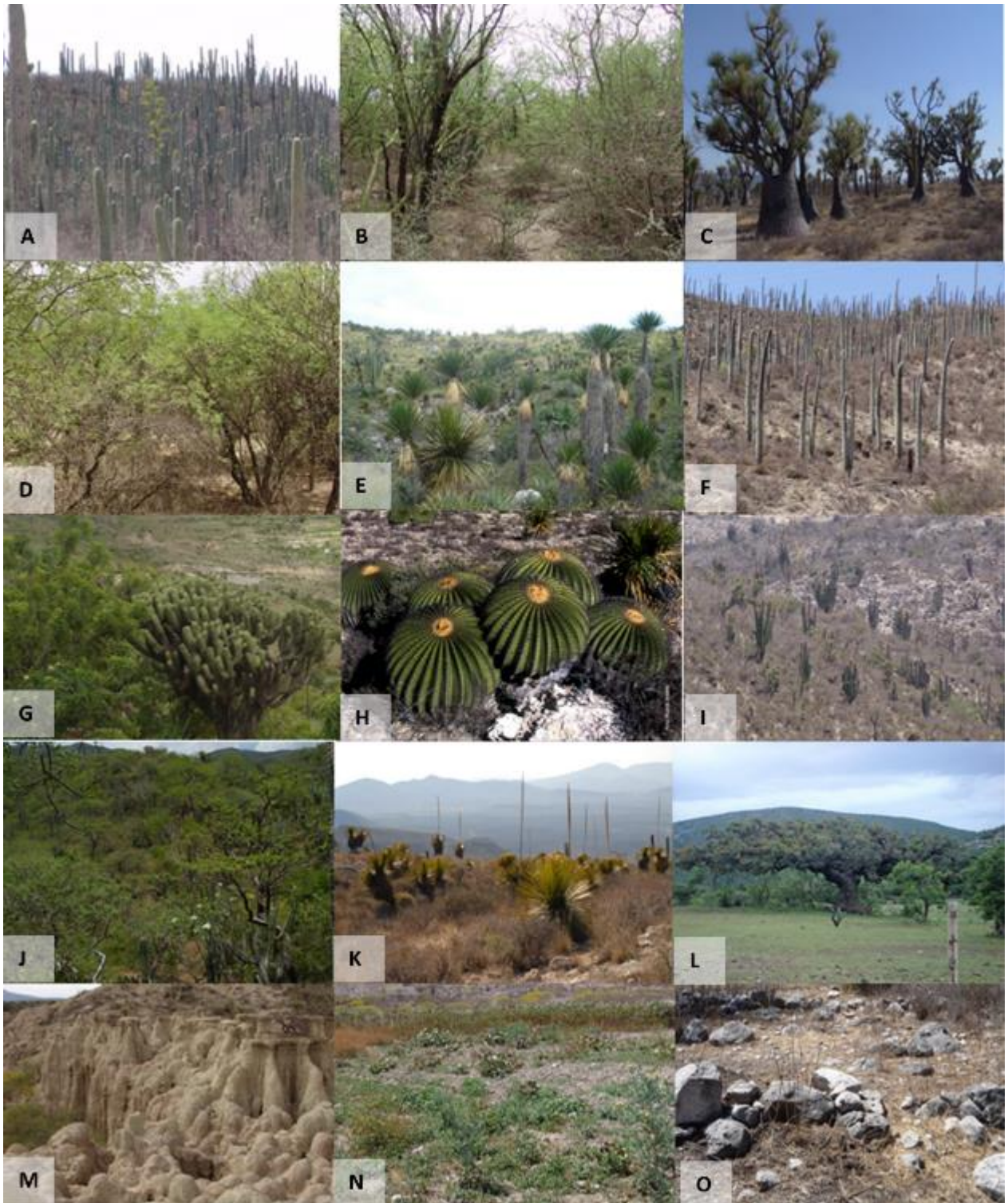
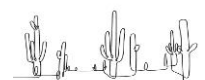


Figura 5. Imágenes de las clases de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: A=Tetechera *C. tetetzo*, B=Matorral espinoso con espinas laterales, C=Izotal *B. gracilis*, D=Mezquite *P. laevigata*, E=Izotal de *Y. periculosa*, F=Cardonal *C. columna-trajani*, G=Chichipera de *P. chichipe*, H = Matorral de *E. platyacanthus*, I=Cardonal de *C. fulviceps*, J=Selva Baja Caducifolia, K=Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliroon* y *Agave*, L=Bosque de *Q. magnoliifolia*, M=Sin cobertura con suelo degradado, N=Zona agrícola, O=Sin cobertura.



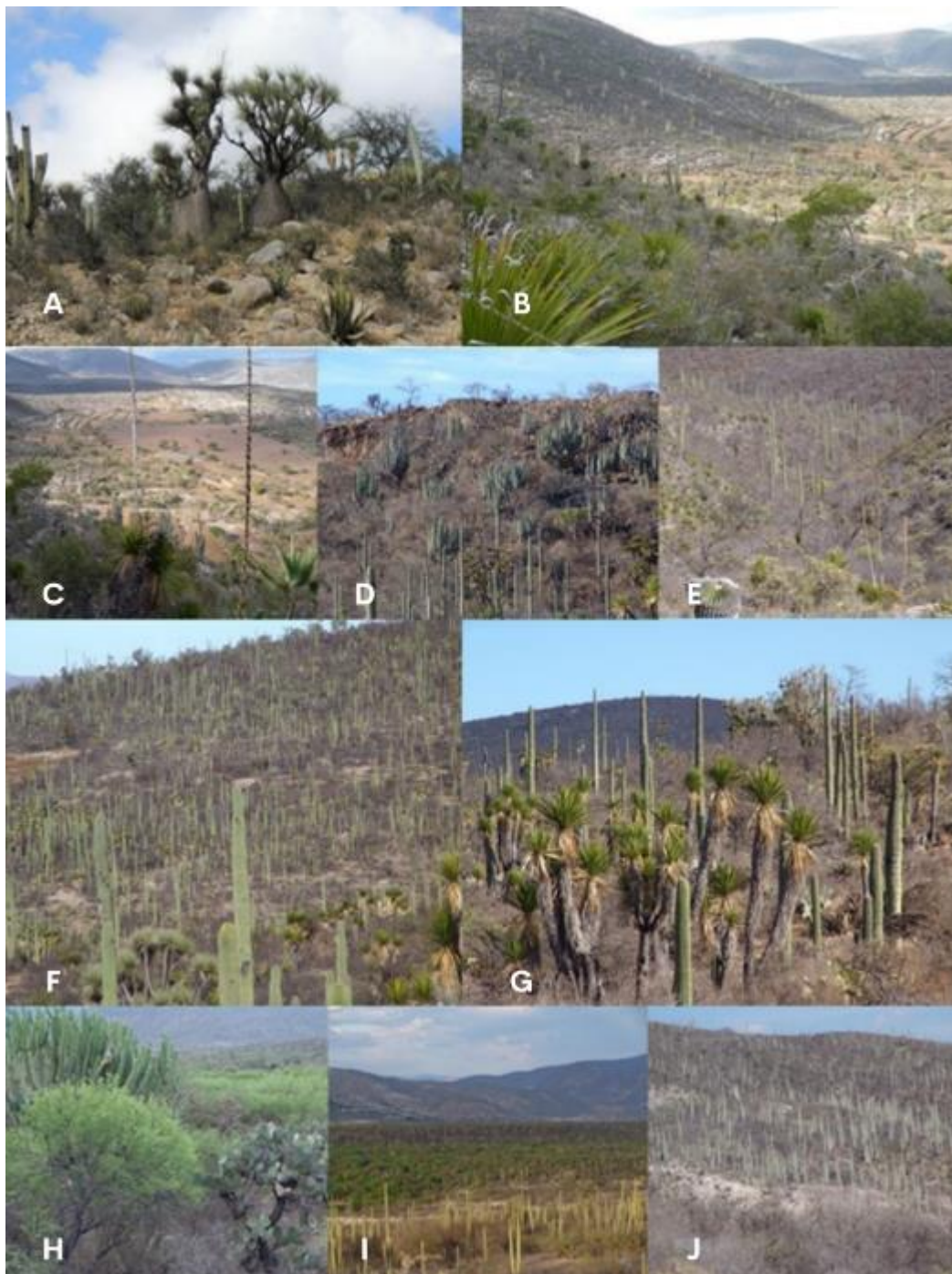
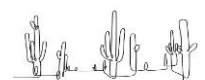
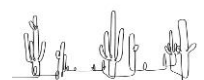


Figura 6. Composición de imágenes que muestra la distribución de las asociaciones vegetales en forma de mosaico y los límites entre ellas. A) Izotal de *B. gracilis*; B) vista panorámica de Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*, en ladera alta, Cardonal de *C. fulviceps*, en ladera media y piedemonte; C) vista panorámica desde Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* que muestra las zonas agrícolas con manchones de Izotal de *Y. periculosa* en la parte plana de una mesa; D) Cardonal de *C. fulviceps* sobre ladera; E) Mexical en la parte alta de la ladera y Tetechera *C. mezcalaensis* en la ladera media; F) vista panorámica de Tetechera *C. tetetzo* con Izotal de *Y. periculosa* e Izotal *B. gracilis*, sobre lomas; G) acercamiento de la anterior; H) Mezquitil de *P. laevigata*; I) Tetechera de *C. tetetzo* y sus límites con el Mezquitil; J) Cardonal de *C. columna-trajani* y sus límites hacia el Matorral espinoso con espinas laterales en la planicie.



La evaluación del mapa final mostró una exactitud total de la clasificación de 0.68 y un coeficiente de Kappa, de 0.63. Todas las clases obtuvieron valores de especificidad entre 0.95 y 0.99 (Cuadro 3). En el caso de la sensibilidad o exactitud del usuario, el cardonal de *Cephalocereus fulviceps*, la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, la selva baja caducifolia, el mezquital de *Prosopis laevigata* y los asentamientos humanos, presentaron los valores más altos: 0.87, 0.84, 0.82, 0.95 y 0.89, respectivamente. Por su parte, el izotal de *Yucca periculosa* y las zonas agrícolas, obtuvieron valores intermedios de 0.67 y 0.69, mientras que el bosque de *Quercus magnoliifolia*, el matorral espinoso con espinas laterales y el matorral de *Echinocactus platyacanthus* registraron valores más bajos, siendo de 0.38, 0.34, 0.25, respectivamente. Considerando la superficie que cubre cada clase en el terreno, lo anterior indica que el 58.4% del territorio presenta un valor de exactitud de usuario muy alto (0.67-0.95), el 32.3%, un valor medio (0.42-0.6) y el 9.3%, bajo (0.25-0.38).



Cuadro 3. Matriz de confusión entre clases del mapa de CVUT actual (2018) y los datos de referencia (valores en pixeles). 1=Bosque de *Quercus magnoliifolia*; 2=Matorral Espinoso con espinas laterales; 3=Matorral de *Echinocactus platyacanthus*; 4=Matorral Crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*; 5=Cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*; 6=Cardonal de *C. fulviceps*; 7=Tetechera de *C. tetetza*; 8=Chichipera de *Polaskia chichipe*; 9=Izotal de *Beaucarnea gracilis*; 10=Izotal de *Yucca periculosa*; 11=Selva baja caducifolia; 12=Mezquital de *Prosopis laevigata*; 13=Mexical; 14=Zona agrícola; 15=Asentamientos humanos; 16=Sin cobertura; 17=Sin cobertura, con suelo degradado; Sen=Sensibilidad (exactitud de usuario); Esp=Especificidad.

	Clase mapa																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Total
1	257			2	31				76				125					491
2		665	39		57	10	257			271	12			35	1	63	27	1437
3	8	35	156	10	124	90	62			311				27		2	5	830
4		151	65	284	2	36	43	17	48	78			17	20				761
5	22	250	103		645	80	177			312	15			46	23	28	19	1720
6	78	225	156	86	275	3282	15	278	59	397			16	52		30	14	4963
7	70	241	3			1	8076	1	75	339			196	10				9012
8		28	9			7		479	256	15			58					852
9	78	103	66	41		2	252	190	1524	339	27		284					2906
10	78	1	15	94	3	129	125	8	51	4393			369					5266
11	3	61					259			97	319		4	4				747
12		10					307				16	96		132	5			566
13	18			3				25	211			5	1055	1		4	17	1339
14	58	202		7	5	142	35	9	226	24			7	2465	101	206	78	3565
15	12				3				5	12				66	1168	103	46	1415
16		2			3			5						326	3	455	178	972
17		9			3		3							379	8	187	427	1016
Total	682	1983	612	527	1151	3779	9616	1007	2531	6588	389	101	2131	3563	1309	1078	811	37858
Sen	0.38	0.34	0.25	0.54	0.56	0.87	0.84	0.48	0.60	0.67	0.82	0.95	0.50	0.69	0.89	0.42	0.53	0.61
Esp	0.99	0.98	0.98	0.99	0.97	0.95	0.97	0.99	0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98

Exactitud total: 0.68; índice de Kappa: 0.63



6.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno de 1995 y 2007

Los datos de 1995, registraron que el 80.4% de la zona (34,671.33 ha) presentaba cobertura vegetal natural, el 9.8% (4,243.5 ha) carecía de ésta, y en el 9% (3,881.97 ha) se desarrollaban actividades agrícolas. Para la cobertura vegetal natural se encontró que la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* era la clase dominante, cubriendo 21.2% del área (9,149.94 ha), seguida del izotal de *Yucca periculosa* (20.59% y 8,882.46 ha), el mexical (9.29%, 4,008.24 ha) y el izotal de *Beaucarnea gracilis* (7.6%, 3,292.47 ha). Las demás clases se distribuían en menos del 6% del territorio cada una. Por su parte, los asentamientos humanos cubrían un 0.82% del territorio (352.62 ha) y las zonas sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado, se distribuían en el 5.1% y 4.8% del área, con 2,193.12 y 2,050.38 ha, respectivamente (Cuadro 4, Figura 7).

Cuadro 4. Superficie en hectáreas y porcentaje por clase de cobertura vegetal y uso del terreno para 1995 y 2007

No.	Nombre de la clase	Clave	1995		2007	
			Sup. (ha)	Sup. (%)	Sup. (ha)	Sup. (%)
Cobertura vegetal natural						
1	Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i>	BQm	782.37	1.81	782.37	1.81
2	Matorral Espinoso con espinas laterales	MEel	2872.08	6.66	2824.29	6.65
3	Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i>	M_Ep	451.71	1.05	451.71	1.05
4	Matorral crasi-rosulifolio de <i>Dasyllirion</i> y <i>Agave</i>	MCR_DA	635.22	1.47	635.22	1.47
5	Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i>	Car_Cct	446.13	1.03	446.13	1.03
6	Cardonal de <i>Cephalocereus fulviceps</i>	Car_Cf	2635.65	6.11	2632.77	6.10
7	Tetechera de <i>Cephalocereus tetetzo</i>	Tet_Ct	9149.94	21.21	9138.78	21.18
8	Chichipera <i>Polaskia chichipe</i>	Ch_Pch	1249.38	2.90	1249.38	2.90
9	Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i>	Iz_Bg	3292.47	7.63	3290.94	7.63
10	Izotal de <i>Yucca periculosa</i>	Iz_Yp	8882.46	20.59	8875.8	20.57
11	Selva Baja Caducifolia	SBC	242.73	0.56	241.74	0.56
12	Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i>	Mez_Pl	22.95	0.05	22.95	0.05
13	Mexical	Mex	4 008.24	9.29	4007.16	9.29
Uso del terreno y otros elementos						
14	Zona Agrícola	ZA	3881.97	9.00	3841.47	8.90
15	Asentamientos Humanos	AH	352.62	0.82	468.81	1.09
16	Sin Cobertura	SC	2193.12	5.08	2189.52	5.07
17	Sin Cobertura con suelo degradado	SC_sd	2050.38	4.75	2050.38	4.75



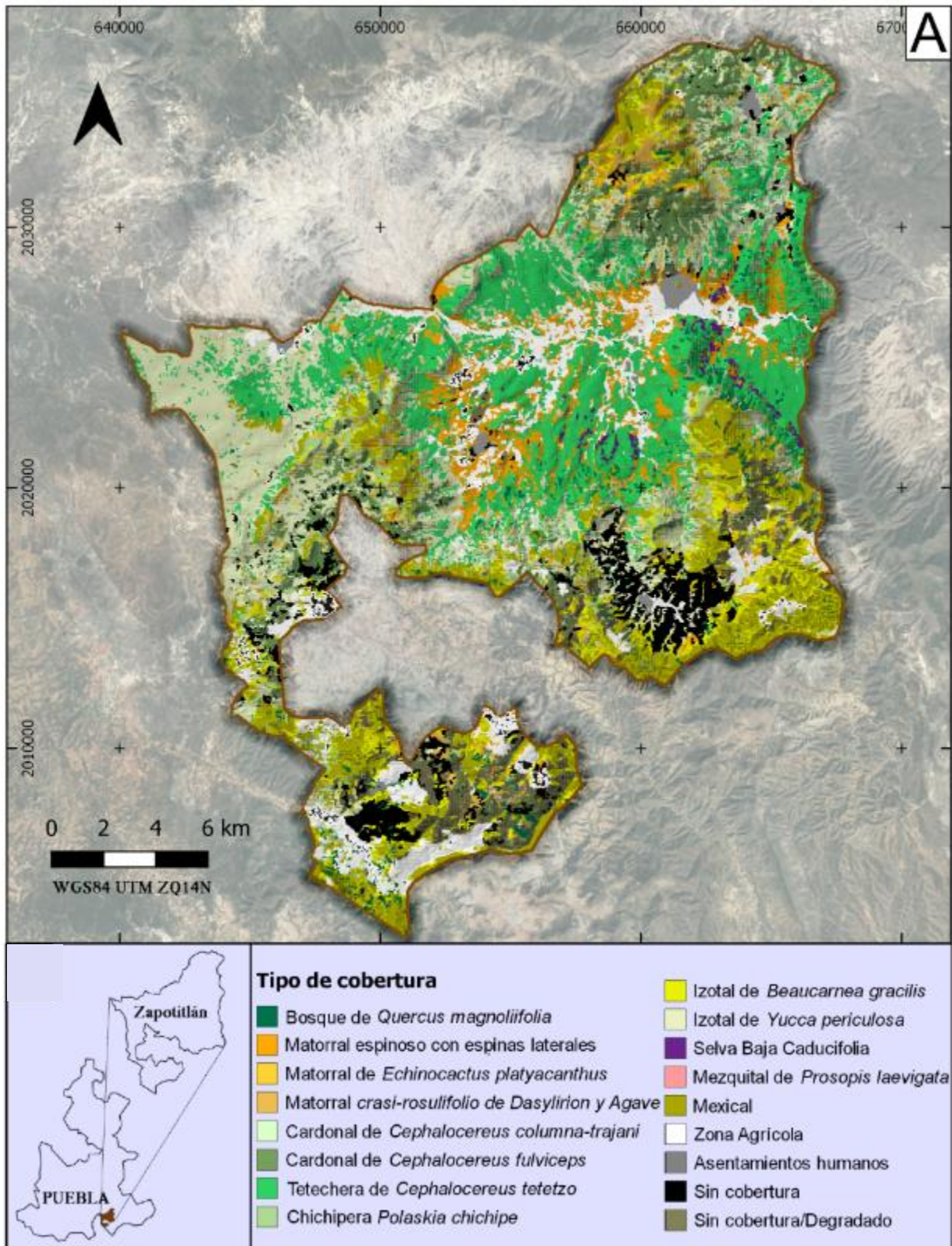
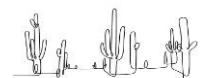
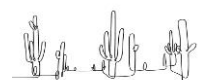


Figura 7. Mapa de cobertura vegetal y uso del terreno de 1995.



En el 2007, se registró que el 80.2% de la zona (34,599.24 ha) presentó cobertura vegetal natural, el 9.8% (4,239.9 ha) carecía de ésta y en el 8.9% (3,841.47 ha) se desarrollaban actividades agrícolas. Para la cobertura vegetal natural se encontró que la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* se mantuvo como la clase dominante, cubriendo 21.18% del área (9,138.78 ha), seguida del izotal de *Yucca periculosa* (20.57% y 8,875.8 ha), el mexical (9.29%, 4,007.16 ha) y el izotal de *Beaucarnea gracilis* (7.63%, 3,290.94 ha). Las demás clases seguían ocupando menos del 6% del territorio cada una. Por su parte, los asentamientos humanos cubrían el 1.09% del territorio (468.81 ha), y las zonas sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado, se distribuían en el 5.07% y 4.75% del área con 2,189.52 y 2,050.38 ha, respectivamente (Cuadro 4, Figura 8).



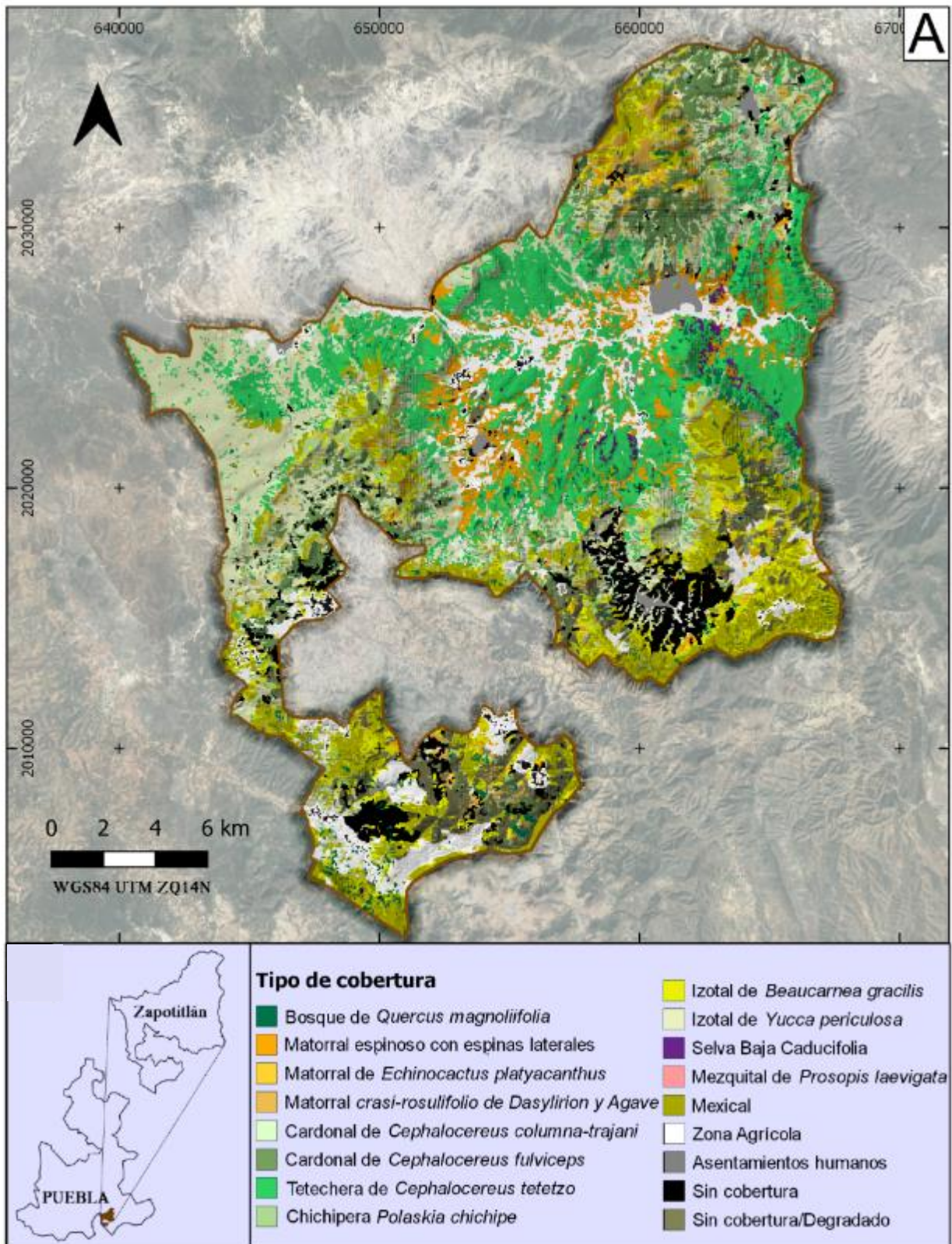
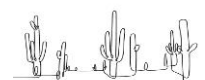


Figura 8. Mapa de cobertura vegetal y uso del terreno de 2007.



6.3. Patrones de cambio de cobertura y uso del terreno (CCUT)

6.3.1. Análisis exploratorio. El análisis mostró que de 1985 a 1993 y de 1993 a 2002, se registraron las tasas de cambio totales más altas, ya que, en un periodo de ocho años, la zona se transformó en un 5.75% y en los siguientes nueve años, en un 4.07%, con tasas anuales de cambio de 1.06% y 1.15%, respectivamente. A partir de 2002 y hasta 2014, las tasas totales fueron considerablemente bajas (0.87%, 0.21% y 0.67%), aunque se puede apreciar un incremento en el periodo de 2011 a 2014, y el mismo patrón en las tasas anuales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tasas de cambio calculadas en el período 1985 – 2014, a partir de las series I a VI de INEGI (1992, 2001, 2003, 2010b, 2013b, 2017)

Series	Período	Total	%	Anual	%
I-II	1985-1993	0.0576	5.7560	0.0106	1.0643
II-III	1993-2002	0.0407	4.0711	0.0116	1.1586
III-IV	2002-2007	0.0087	0.8711	0.0019	0.1932
IV-V	2007-2011	0.0021	0.2135	0.0005	0.0534
V-VI	2011-2014	0.0067	0.6715	0.0022	0.2248

6.3.2. Análisis de CCUT 1995-2007, 2007-2018. El análisis mostró que en 23 años se perdieron 285.8 ha de cobertura vegetal natural, mismas que fueron ocupadas por los asentamientos humanos (192.06 ha), las zonas sin cobertura (11.79 ha) y sin cobertura con suelo degradado (122.67 ha). Destacan las zonas agrícolas que perdieron 40.5 ha, entre 1995 y 2007 (Figura 9, Cuadro 6).

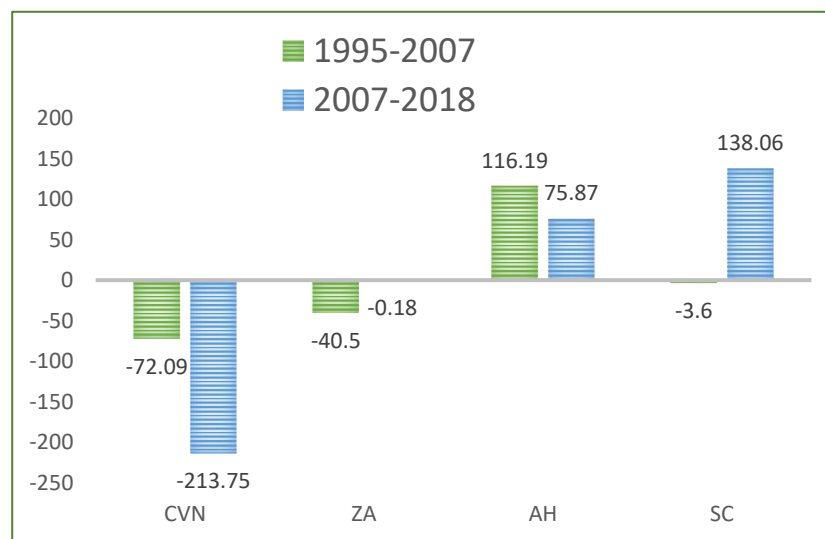


Figura 9. Superficie de cambio en hectáreas de cobertura vegetal natural (CVN), zonas agrícolas (ZA), asentamientos humanos (AH) y zonas sin cobertura (SC) en los períodos 1995-2007, 2007-2018



Específicamente, el cardonal de *Cephalocereus fulviceps* perdió 90.9 ha, principalmente en el período 2007-2018 (88.02 ha), por lo que entre 1995 y 2018 perdió el 3.57% de su superficie. Por su parte, el matorral espinoso con espinas laterales perdió 47.7 ha de 1995 a 2007 y 31.4 ha de 2007 a 2018, registrando un total de 79.2 ha perdidas, y el 2.84% de 1995 a 2018. El izotal de *Yucca periculosa* y la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* perdieron 29.5 y 20.25 ha, respectivamente, a lo largo de los dos períodos analizados; mientras que el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* y el cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* perdieron 28.44 y 28.71 ha, solo entre 2007 y 2018, lo que representa una pérdida del 4.69% y el 6.88%, de 1995 a 2018, respectivamente (Cuadro 6, Figura 10).

Cuadro 6. Superficie de cambio en hectáreas por clase de cobertura vegetal y uso actual del terreno en los períodos 1995-2007 (t1-t2), 2007-2018 (t2-t3) y 1995-2018 (t1-t3).
(Los valores negativos representan pérdida de cobertura)

		1995-2007	2007-2018	1995-2018
No.	Nombre de la clase	Sup. (ha)	Sup. (ha)	Sup. (ha)
Cobertura vegetal natural				
1	Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i>	0.00	0.00	0.00
2	Matorral Espinoso con espinas laterales	-47.79	-31.41	-79.20
3	Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i>	0.00	-1.08	-1.08
4	Matorral crasi-rosulifolio de <i>Dasyllirion</i> y <i>Agave</i>	0.00	-28.44	-28.44
5	Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i>	0.00	-28.71	-28.71
6	Cardonal de <i>Cephalocereus fulviceps</i>	-2.88	-88.02	-90.9
7	Tetechera de <i>Cephalocereus tetetzo</i>	-11.16	-9.09	-20.25
8	Chichipera <i>Polaskia chichipe</i>	0.00	-1.17	-1.17
9	Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i>	-1.53	-1.26	-2.79
10	Izotal de <i>Yucca periculosa</i>	-6.66	-22.86	-29.52
11	Selva Baja Caducifolia	-0.99	0.00	-0.99
12	Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i>	0.00	0.00	0.00
13	Mexical	-1.08	-1.71	-2.79
Pérdida		-72.09	-213.75	-285.84
Uso del terreno y otros elementos				
14	Zona Agrícola	-40.50	-0.18	-40.68
15	Asentamientos Humanos	116.19	75.87	192.06
16	Sin Cobertura	-3.60	15.39	11.79
17	Sin Cobertura con suelo degradado	0.00	122.67	122.67
Ganancia		72.09	213.75	285.84



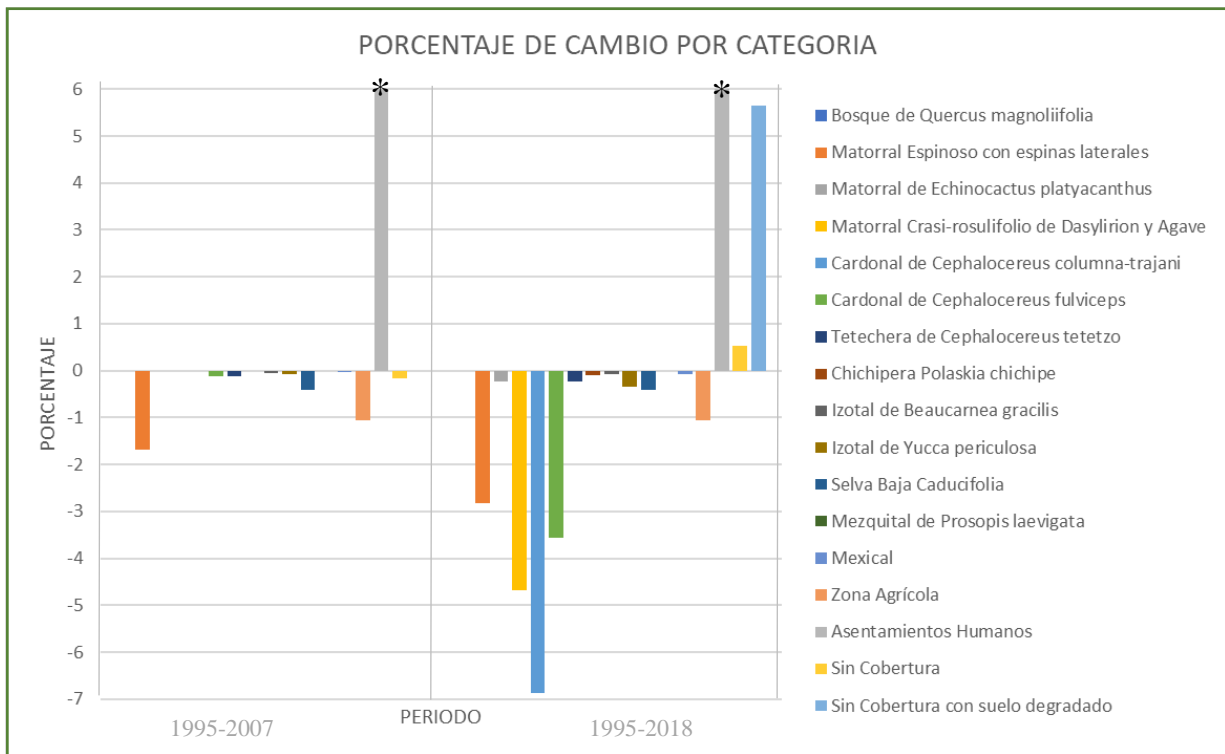
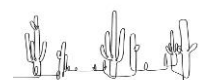


Figura 10. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2007 y de 1995 a 2018. (*El valor en los asentamientos humanos está truncado para poder representar mejor el resto de las clases).

La ganancia de superficie por los asentamientos humanos, que entre 1995 y 2018 fue del 35.26%, se aprecia principalmente en la localidad de Zapotitlán Salinas en la porción central del municipio y las zonas sin cobertura en San Antonio Texcala, al noreste, que ganaron un 5.65% en los 23 años de análisis (Figuras 10 y 11).



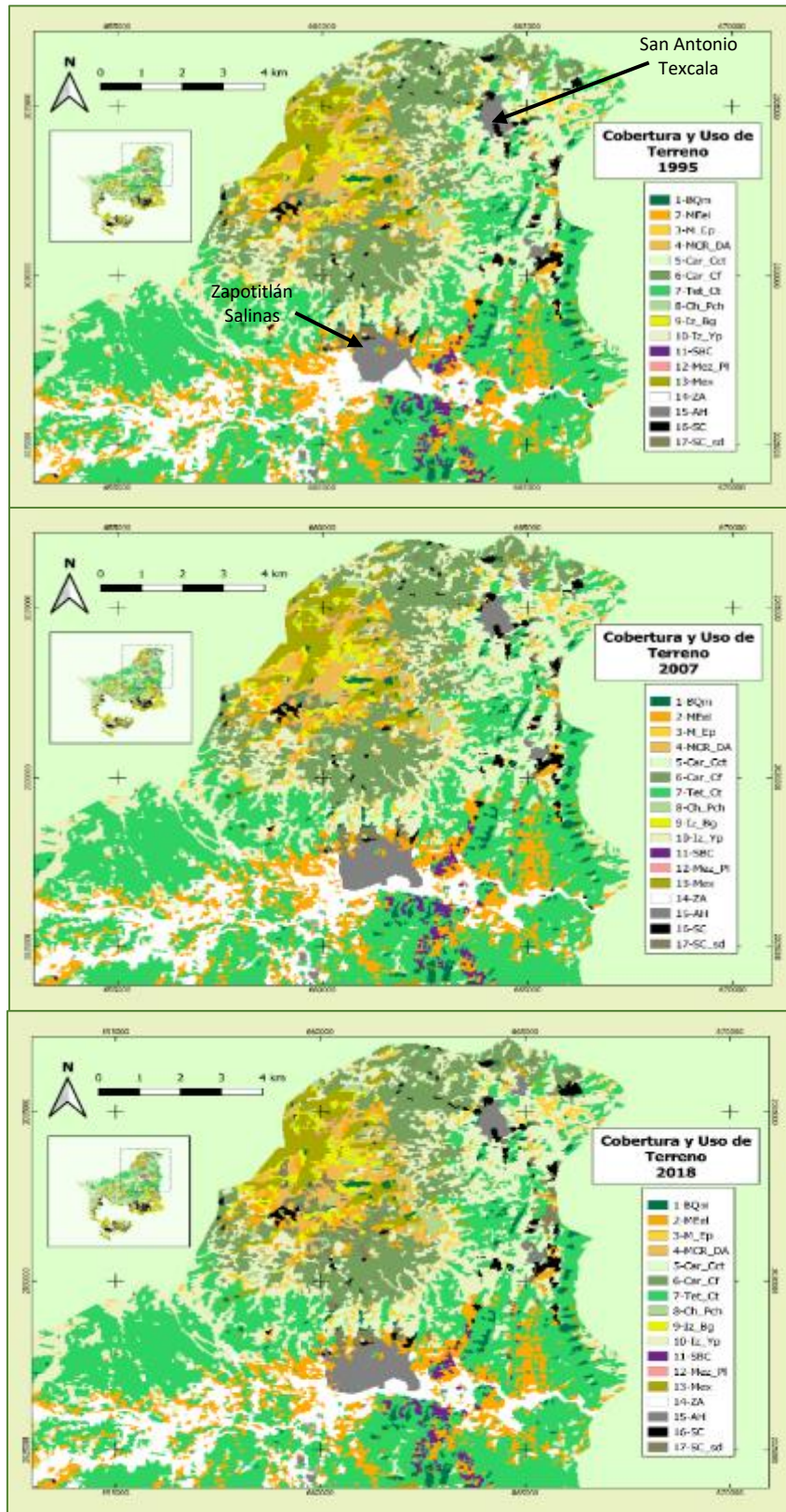


Figura 11. Corte de los mapas que ilustran el crecimiento de los asentamientos humanos de 1995-2007-2018.



6.3.3. Modelación de cambio de cobertura y uso del terreno.

La tasa de cambio anual entre 1995 y 2007 (escenario previo al decreto de la Reserva de la Biósfera) para el municipio fue de 2.02%. El matorral espinoso con espinas laterales sufrió un proceso de conversión a zona agrícola, asentamientos humanos, suelo sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado con una tasa neta del 2.76%, presentando una tasa anual del 0.23%. El cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* se transformó en suelo sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado en un 1.76%, con una tasa anual del 0.55%; mientras que las zonas agrícolas se transformaron en asentamientos humanos en un 4.19%, con una tasa anual de 0.36%. Por último, las zonas sin cobertura se convirtieron a zonas agrícolas y asentamientos humanos en un 1.07%, con una tasa anual de 0.09% (Figura 12).

Tasa de cambio neta (1995-2007) (valores en %)						Tasa de cambio anual (1995-2007) (valores en %)					
(A) 1995	2007					(B) 1995	2007				
	ZA	AH	SC	SC_sd	TOTALES		ZA	AH	SC	SC_sd	TOTALES
BQm	ND	ND	ND	ND	0	BQm	ND	ND	ND	ND	0.0
MEel	2.2280	0.3071	0.1285	0.0940	2.76	MEel	0.1918	0.0221	0.0109	0.0079	0.23
M_Ep	ND	ND	0.2391	ND	0.24	M_Ep	ND	ND	0.0200	ND	0.02
MCR_DA	ND	ND	ND	0.0448	0.04	MCR_DA	ND	ND	ND	0.3810	0.38
Car_Cct	ND	ND	1.7147	0.0472	1.76	Car_Cct	ND	ND	0.1480	0.4055	0.55
Car_Cf	0.1571	ND	0.6864	0.0261	0.87	Car_Cf	0.0135	ND	0.0584	0.2206	0.29
Tet_Ct	0.2075	ND	0.0138	ND	0.22	Tet_Ct	0.0177	ND	0.0012	ND	0.02
Ch_Pch	0.0936	ND	ND	ND	0.09	Ch_Pch	0.0080	ND	ND	ND	0.01
Iz_Bg	0.0574	ND	ND	0.0003	0.06	Iz_Bg	0.0049	ND	ND	0.0023	0.01
Iz_Yp	0.2827	ND	0.0395	0.0001	0.32	Iz_Yp	0.0241	ND	0.0033	0.0008	0.03
SBC	0.4079	ND	ND	ND	0.41	SBC	0.0347	ND	ND	ND	0.03
Mez_Pl	ND	ND	ND	ND	0	Mez_Pl	ND	ND	ND	ND	0.00
Mex	0.0696	ND	ND	ND	0.07	Mex	0.0059	ND	ND	ND	0.01
ZA		4.1940	ND	ND	4.19	ZA		0.3564	ND	ND	0.36
AH	ND		ND	ND	0.00	AH	ND		ND	ND	0.00
SC	0.1395	0.9315		ND	1.07	SC	0.0119	0.0778		ND	0.09
SC_sd	ND	ND	ND	ND	0	SC_sd	ND	ND	ND	ND	0.00

Figura 12. Matriz de transición con tasas de cambio neto (A) y anual (B) para el período 1995–2007. (BQm=Bosque de *Quercus magnoliifolia*; ME_el=Matorral Espinoso con espinas laterales; M_Ep=Matorral de *Echinocactus platyacanthus*; MCR_DA=Matorral Crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*; Car_Cct=Cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*; Car_Cf=Cardonal de *C. fulviceps*; Tet_Ct=Tetechera de *C. tetetzo*; Ch_Pch=Chichipera de *Polaskia chichipe*; Iz_Bg=Izotal de *Beaucarnea gracilis*; Iz_Yp=Izotal de *Yucca periculosa*; SBC=Selva baja caducifolia; Mez_Pl=Mezquitil de *Prosopis laevigata*; Mex=Mexical; ZA=Zona agrícola; AH=Asentamientos humanos; SC=Sin cobertura; SC_sd=Sin cobertura, con suelo degradado).



En la transición identificada de la zona agrícola a los asentamientos humanos, en el período de 1995-2007, se encontró que las variables que tienen un efecto positivo para que dicha transición ocurra, son la distancia a los asentamientos humanos (0-450 m), y a los caminos (0-790 m). En contraste, la distancia entre los 0 y 400 m a las corrientes de agua perenne ejerce un efecto negativo, y después de los 400 m, es positivo (Figura 13).

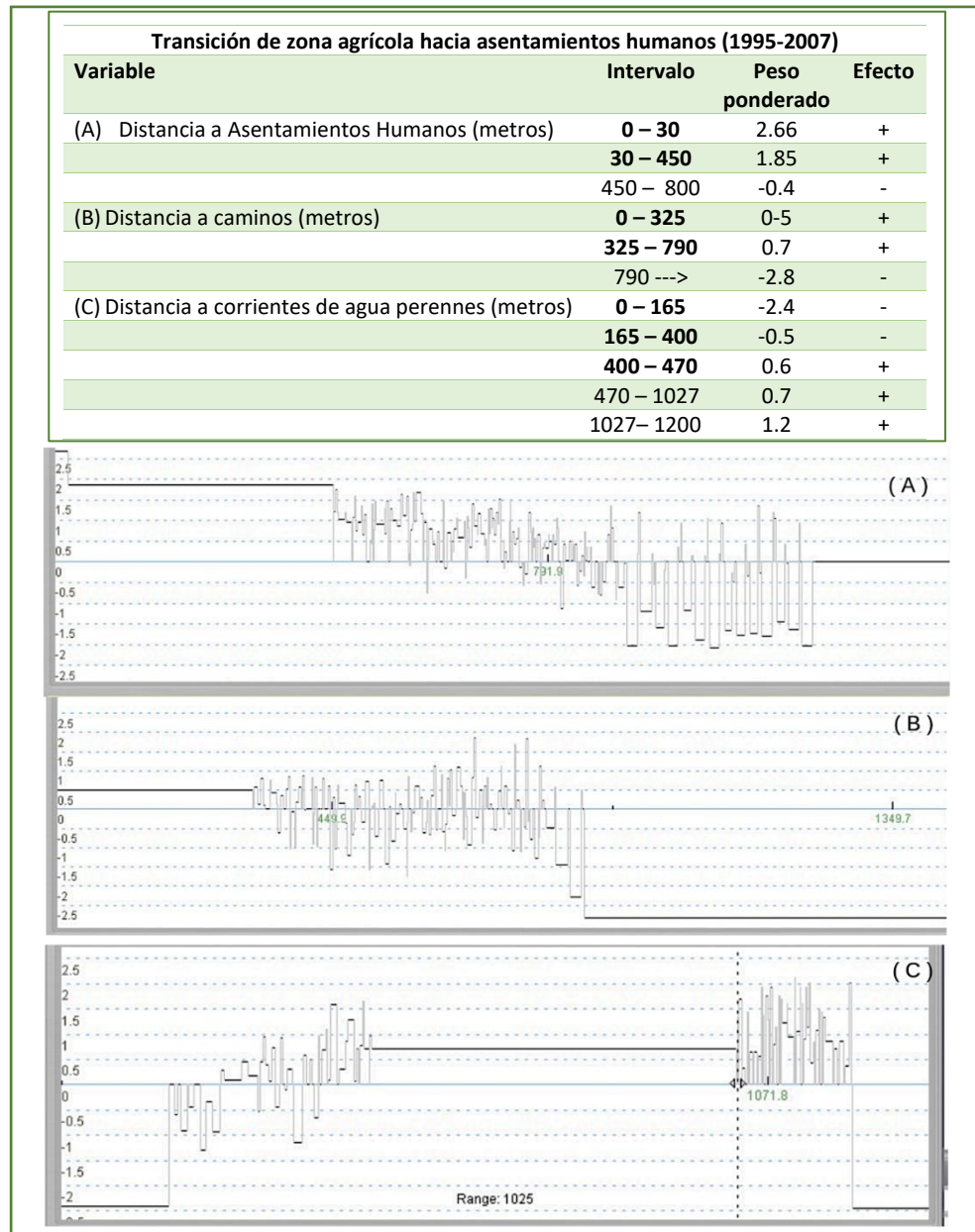


Figura 13. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición de las zonas agrícolas a los asentamientos humanos de 1995 a 2007; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición. El eje de las X ilustra la distancia en metros y el eje Y, el peso ponderado de cada variable. (A) Muestra el efecto positivo de la distancia a los asentamientos humanos hasta los 450 m y después negativo hasta los 800 m. (B) Muestra el efecto positivo de la distancia a los caminos hasta los 790 m. (C) Muestra el efecto negativo de la distancia a los cuerpos de agua perennes hasta los 400 m y después positivo hasta los 1027 m, volviendo a ser positivo hasta los 1200 m.



En la transición del matorral espinoso con espinas laterales a la zona agrícola, se encontró que las variables que tienen un efecto positivo para que la transición ocurra son las distancias a los asentamientos humanos (43-135 m) y a los caminos (0-331 metros), así como el tipo de suelo, en donde se encuentran asociaciones edáficas de Leptosol y Feozem calcáricos (Figura 14).

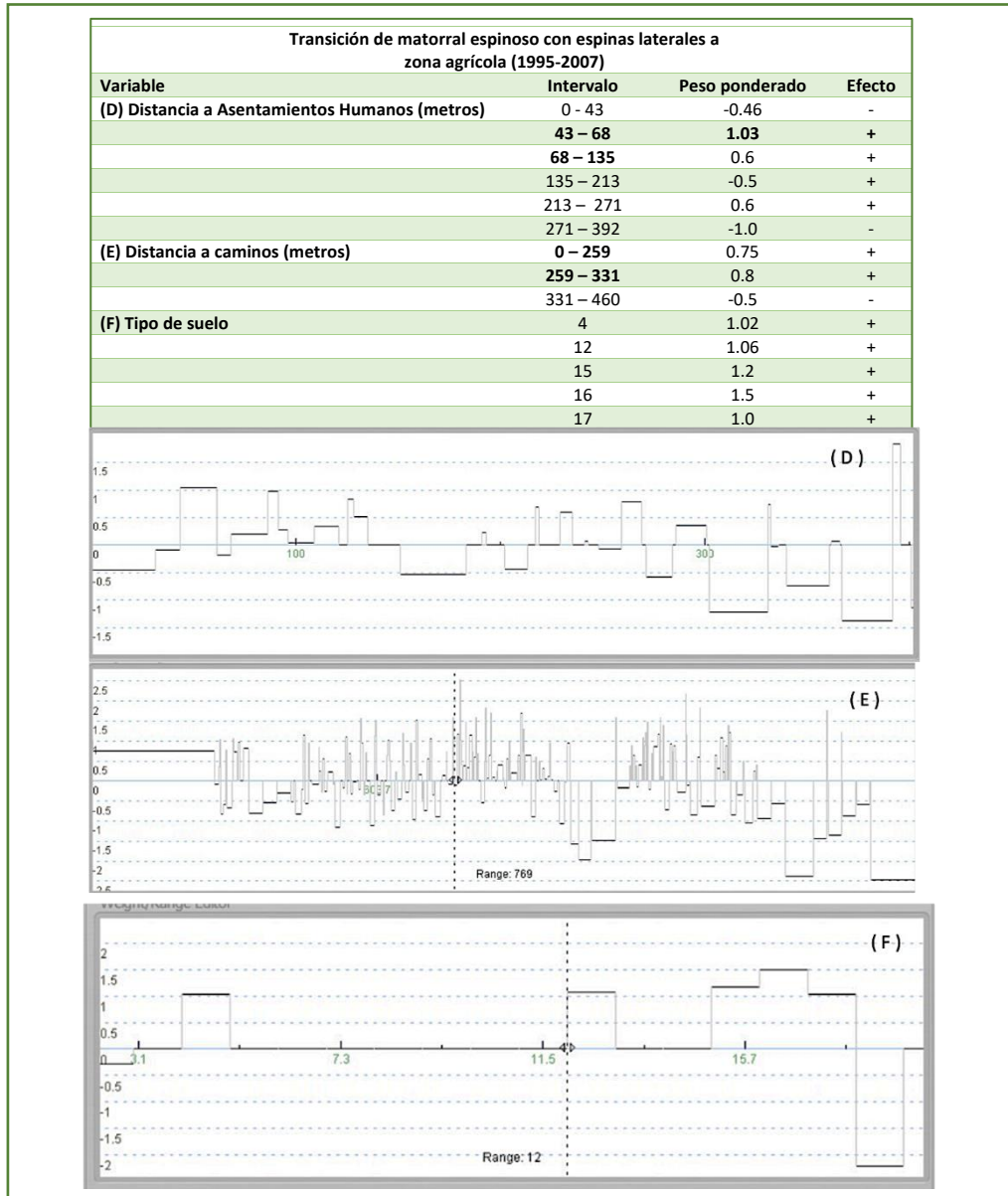


Figura 14. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del matorral espinoso con espinas laterales a las zonas agrícolas, de 1995 a 2007; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición. El eje de las X ilustra la distancia en metros en (D) y (E) y el tipo de suelo en (F). En el eje Y, se indica el peso ponderado de cada variable. (D) Muestra el efecto negativo de la distancia a los asentamientos humanos hasta los 43 m y después positivo hasta los 271 m. (E) Muestra el efecto positivo de la distancia a los caminos hasta los 331 m y después negativo hasta los 460 m. (F) Presenta el efecto positivo de los tipos de suelo los tipos 4, 12, 15, 16 y 17 (Ver Anexo 2).



En el escenario posterior al decreto de la Reserva de la Biósfera (2007 – 2018), la tasa de cambio anual en el municipio fue de 1.7%. El cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* sufrió un proceso de conversión a suelo sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado con tasas neta y anual de 6.44% y 0.6%, respectivamente. El matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* se transformó en suelo sin cobertura con suelo degradado presentando tasas neta y anual de 4.48% y 0.42%, el cardonal de *C. fulviceps* se convirtió en zona agrícola, suelo sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado presentando una tasa neta de 3.34% y el matorral espinoso con espinas laterales se transformó en las mismas cuatro clases que en el período anterior, pero a una menor tasa anual (0.1%), registrando una tasa neta de 1.11%. Finalmente, las zonas agrícolas se transformaron en asentamientos humanos presentando tasas neta y anual de 1.3% y 0.12%, respectivamente y las zonas sin cobertura se convirtieron en zonas agrícolas y asentamientos humanos a una tasa neta de 0.91%, registrando una tasa anual de 0.08% (Figura 15).

Tasa de cambio neta (2007-2018) (valores en %)						Tasa de cambio anual (2007-2018) (valores en %)					
2018						2018					
2007	ZA	AH	SC	SC_sd	TOTALES	2007	ZA	AH	SC	SC_sd	TOTALES
BQm	ND	ND	ND	ND	0.0	BQm	ND	ND	ND	ND	0.00
MEel	0.5736	0.3123	0.1307	0.0956	1.11	MEel	0.0527	0.0282	0.0120	0.0087	0.10
M_Ep	ND	ND	0.2391	ND	0.24	M_Ep	ND	ND	0.0218	ND	0.02
MCR_DA	ND	ND	ND	4.4772	4.48	MCR_DA	ND	ND	ND	0.4155	0.42
Car_Cct	ND	ND	1.7147	4.7206	6.44	Car_Cct	ND	ND	0.1613	0.4422	0.60
Car_Cf	0.0479	ND	0.6871	2.6083	3.34	Car_Cf	0.0044	ND	0.0637	0.2408	0.31
Tet_Ct	0.0857	ND	0.0138	ND	0.10	Tet_Ct	0.0078	ND	0.0013	ND	0.01
Ch_Pch	0.0936	ND	ND	ND	0.09	Ch_Pch	0.0086	ND	ND	ND	0.01
Iz_Bg	0.0109	ND	ND	0.0273	0.04	Iz_Bg	0.0010	ND	ND	0.0025	0.00
Iz_Yp	0.2079	ND	0.0395	0.0101	0.26	Iz_Yp	0.0190	ND	0.0036	0.0009	0.02
SBC	ND	ND	ND	ND	0.00	SBC	ND	ND	ND	ND	0.00
Mez_Pl	ND	ND	ND	ND	0.0	Mez_Pl	ND	ND	ND	ND	0.00
Mex	0.0427	ND	ND	ND	0.04	Mex	0.0039	ND	ND	ND	0.00
ZA		1.3073	ND	ND	1.31	ZA		0.1196	ND	ND	0.12
AH	ND		ND	ND	0.00	AH	ND		ND	ND	0.00
SC	0.1398	0.7687		ND	0.91	SC	0.0128	0.0701		ND	0.08
SC_sd	ND	ND	ND		0.0	SC_sd	ND	ND	ND		0.00

Figura 15. Tasas de cambio neta (A) y anual (B) para el período 2007–2018.

(BQm=Bosque de *Quercus magnoliifolia*; ME_el=Matorral Espinoso con espinas laterales; M_Ep=Matorral de *Echinocactus platyacanthus*; MCR_DA=Matorral Crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*; Car_Cct=Cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*; Car_Cf=Cardonal de *C. fulviceps*; Tet_Ct=Tetechera de *C. tetetzo*; Ch_Pch=Chichipera de *Polaskia chichipe*; Iz_Bg=Izotal de *Beaucarnea gracilis*; Iz_Yp=Izotal de *Yucca periculosa*; SBC=Selva baja caducifolia; Mez_Pl=Mezquitil de *Prosopis laevigata*; Mex=Mexical; ZA=Zona agrícola; AH=Asentamientos humanos; SC=Sin cobertura; SC_sd=Sin cobertura, con suelo degradado).



En la transición identificada del cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* a zonas sin cobertura con suelo degradado, en el período de 2007-2018, se encontró que las variables que tienen un efecto positivo para que la transición ocurra, son las distancias a los asentamientos humanos, entre los 490 y 1379 m, y a los caminos, entre los 109 y 565 m, así como los tipos de suelo, entre los que dominan los Letposoles calcárico y lítico (Figura 16).

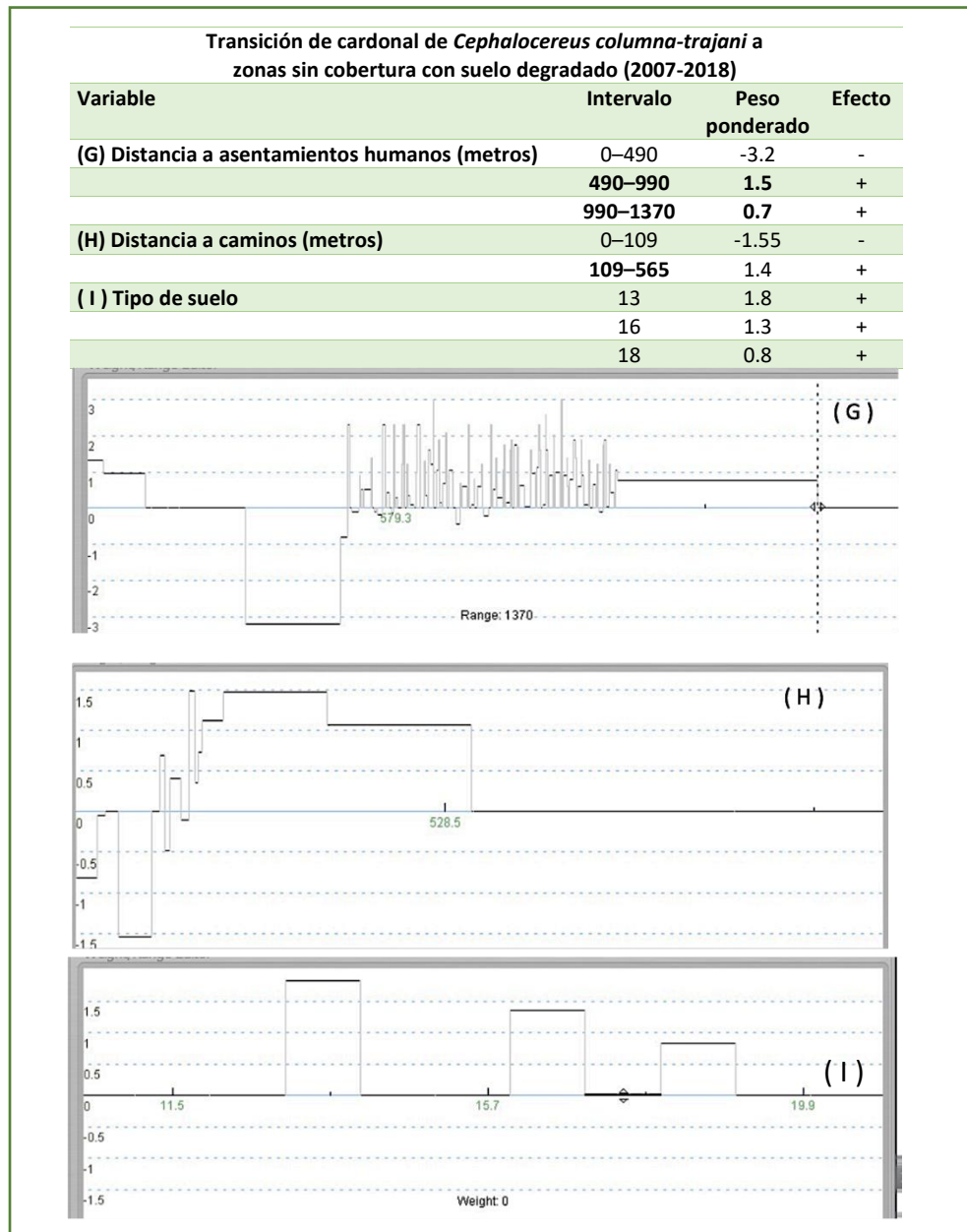


Figura 16. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del cardonal de *C. columna-trajani* a las zonas sin cobertura con suelo degradado, de 2007 a 2018; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición. El eje de las X ilustra la distancia en metros en (G) y (H) y el tipo de suelo en (I). En el eje Y, se indica el peso ponderado de cada variable. (G) Muestra el efecto negativo de la distancia a los asentamientos humanos hasta los 490 m y después positivo hasta los 1370 m. (H) Muestra el efecto negativo de la distancia a los caminos hasta los 109 m y después positivo hasta los 565 m. (I) Presenta el efecto positivo de los tipos de suelo 13, 16 y 18 (Ver Anexo 2).



En la transición identificada del matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliirion* y *Agave* a zonas sin cobertura con suelo degradado, se encontró que las variables que tienen un efecto positivo para que la transición ocurra, son las distancias a los asentamientos humanos, de los 3825 a los 4340 m, y a los caminos, entre los 4100 y 4340 m, así como los tipos de suelo, Leptosol réndzico y Feozem calcárico (Figura 17).

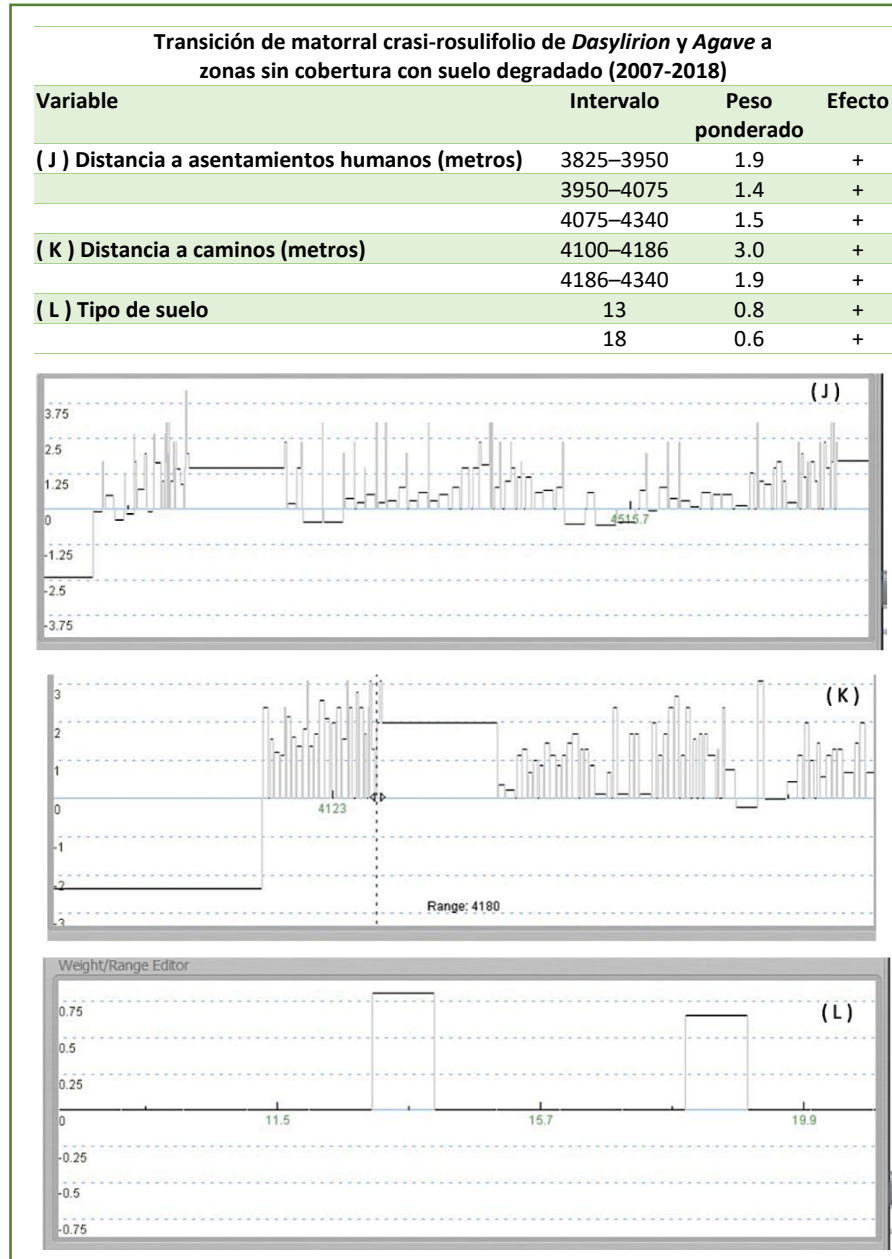


Figura 17. Comportamiento de las variables explicativas con mayor efecto en la transición del matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliirion* y *Agave* a las zonas sin cobertura con suelo degradado, de 2007 a 2018; tomando en cuenta los pesos ponderados calculados a partir de la probabilidad de que ocurra la transición. El eje de las X ilustra la distancia en metros en (J) y (K) y el tipo de suelo en (L). En el eje Y, se indica el peso ponderado de cada variable. (J) Muestra el efecto positivo de la distancia a los asentamientos humanos, hasta los 4340 m. (K) Muestra el efecto positivo de la distancia a los caminos hasta los 4340 m. (L) Presenta el efecto positivo de los tipos de suelo 13 y 18 (Ver Anexo 2).



La proyección hecha para identificar la trayectoria de los cambios, con el escenario de la derogación del decreto de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán-Cuicatlán (RBTC), muestra que para el 2024, la superficie total de la cobertura vegetal natural podría ser de 34,245.72 ha y al 2030 de 34,108.2 ha. El matorral espinoso con espinas laterales sería la clase que más superficie perdería, pasando de 2754.45 ha en 2024, a 2,716 ha en 2030. Por su parte, mientras que el cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* pasaría de 404.28 ha en 2024 a 392.13 ha en 2030, el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliirion* y *Agave* pasaría de 593.1 ha en 2024, a 579.6 ha en 2030 y el cardonal de *C. fulviceps* pasaría de 2500.47 a 2456.82 ha. Las zonas agrícolas también perderían terreno, quedando con 3,801.69 ha en 2030, y los asentamientos humanos pasarían de tener una superficie de 640.71 ha en 2024, a 736.29 ha en 2030 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Proyecciones al 2024 y 2030 del CCUT en los escenarios de derogación (D) y mantenimiento (M) del decreto de la RBTC

Clase	Decreto de la RBTC			
	Derogado	Mantenimiento	Derogado	Mantenimiento
	2024		2030	
	Sup (ha)	Sup (ha)	Sup (ha)	Sup (ha)
Cobertura vegetal natural				
Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i>	782.37	782.37	782.37	782.37
Matorral Espinoso con espinas laterales	2754.45	2775.60	2716.47	2758.32
Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i>	450.09	450.09	449.55	449.55
Matorral crasi-rosulifolio de <i>Dasyliirion</i> y <i>Agave</i>	593.10	591.75	579.60	577.17
Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i>	404.28	404.01	392.13	390.87
Cardonal de <i>Cephalocereus fulviceps</i>	2500.47	2498.04	2456.82	2452.14
Tetechera de <i>Cephalocereus tetetzo</i>	9119.43	9124.83	9109.17	9119.97
Chichipera <i>Polaskia chichipe</i>	1247.67	1247.67	1247.13	1247.13
Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i>	3288.06	3289.14	3286.44	3288.60
Izotal de <i>Yucca periculosa</i>	8837.82	8839.98	8822.70	8827.02
Selva Baja Caducifolia	241.20	241.74	240.66	241.74
Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i>	22.95	22.95	22.95	22.95
Mexical	4003.83	4004.37	4002.21	4003.29
Total	34245.72	34272.54	34108.2	34161.12
Uso del terreno y otros elementos				
Zona Agrícola	3821.49	3840.75	3801.69	3840.21
Asentamientos Humanos	640.71	586.26	736.29	627.84
Sin Cobertura	2209.23	2211.75	2212.74	2218.41
Sin Cobertura con suelo degradado	2232.27	2238.12	2290.50	2301.84
Total	8903.7	8876.88	9041.22	8988.29



En el 2024, considerando la superficie inicial (1995), la pérdida de cobertura vegetal natural, en el escenario de derogación del decreto (D-DR) sería del 29.34% y manteniendo el decreto (M-DR) del 28.64%. El cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* perdería el 10.35% (D-DR) y el 10.43% (M-DR), el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* perdería el 7.1% (D-DR) y el 7.35% (M-DR), el cardonal de *C. fulviceps* perdería 5.41% (D-DR) y 5.51% (M-DR), y el matorral espinoso con espinas laterales perdería el 4.27% (D-DR) y el 3.48% (M-DR). Las zonas agrícolas perderían tan solo el 1.58% (D-DR) y el 1.07% (M-DR), los asentamientos humanos ganarían un 44.96% (D-DR) y un 39.85% (M-DR) y las zonas sin cobertura con suelo degradado ganarían 8.15% (D-DR) y 8.39% (M-DR) (Figuras 18, 19 y 20).

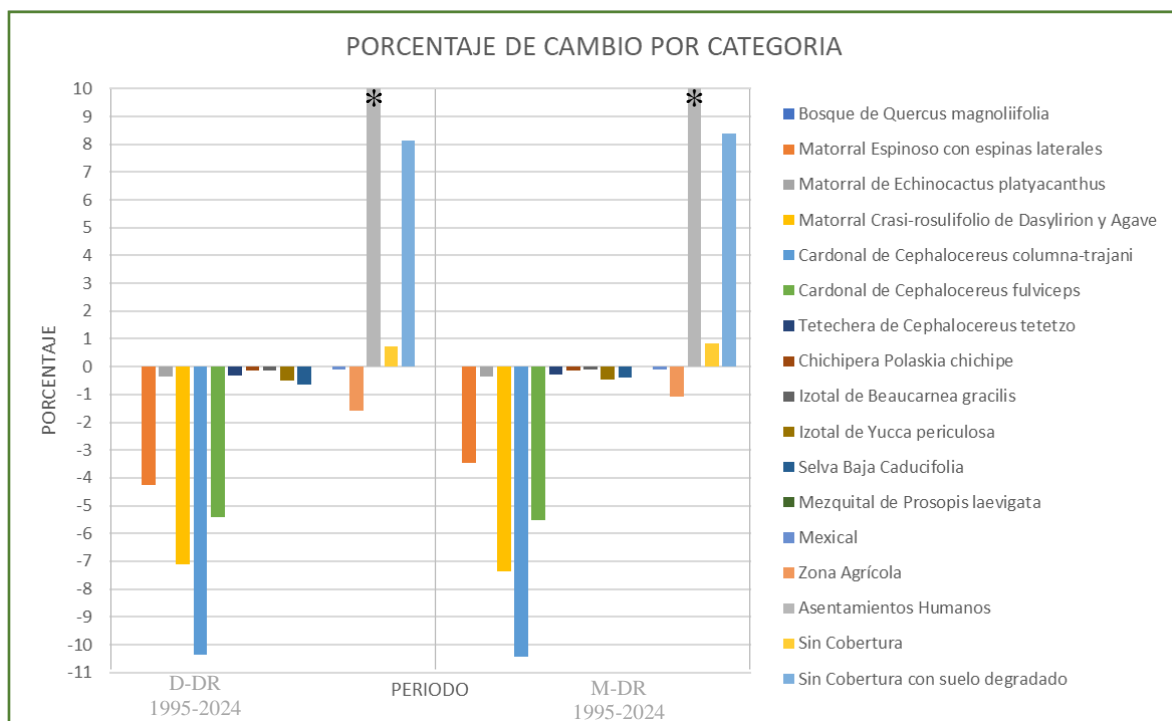


Figura 18. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2024, en los escenarios de derogación (D-DR) y mantenimiento (M-DR) de la RBTC. (*El valor en los asentamientos humanos está truncado para poder representar mejor el resto de las clases).



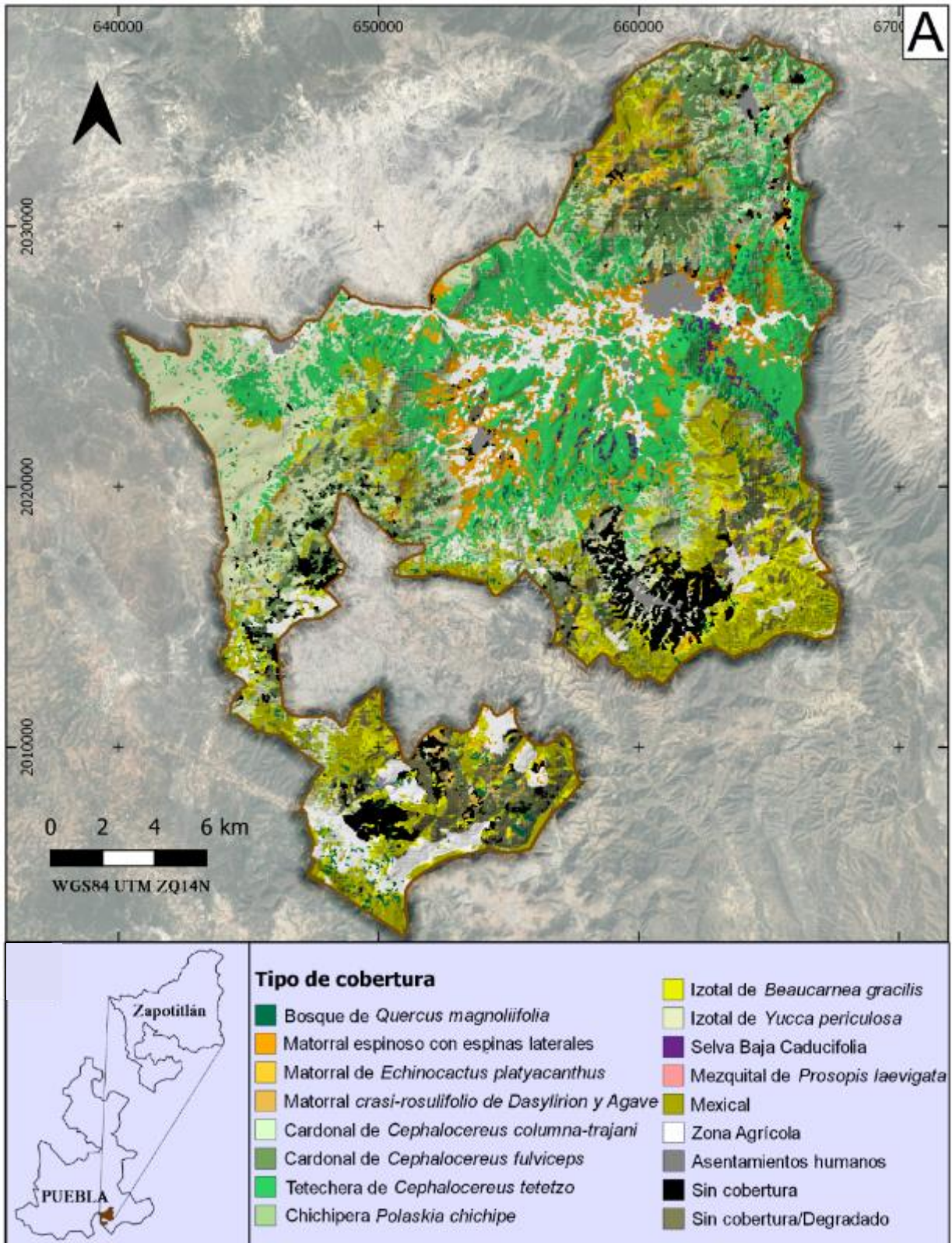
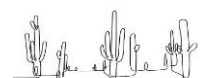


Figura 19. Proyecciones del CCUT al 2024, bajo el escenario de derogación del decreto (D-DR) de la RBTC



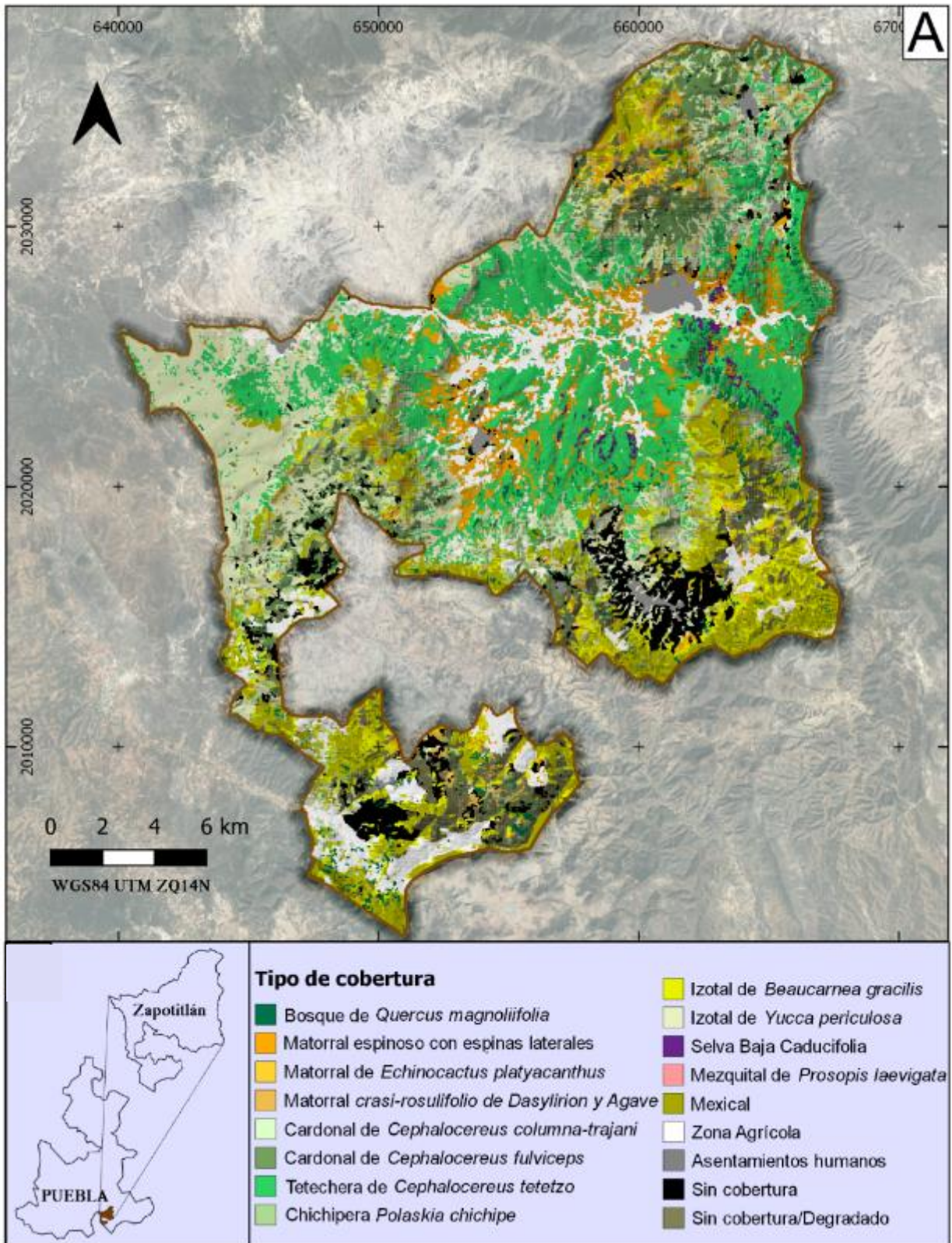
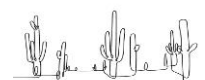


Figura 20. Proyecciones del CCUT al 2024 bajo el escenario de mantenimiento del decreto (M-DR) de la RBTC



En el 2030, considerando la superficie inicial (1995), la pérdida de cobertura vegetal natural, en el escenario de derogación del decreto (D-DR) sería del 39.36% y manteniendo el decreto (M-DR) podría ser de 38.07%. El cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* perdería el 13.77% (D-DR) y el 14.14% (M-DR), el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliroion* y *Agave* perdería el 9.6% (D-DR) y el 10.06% (M-DR), el cardonal de *C. fulviceps* perdería 7.28% (D-DR) y 7.48% (M-DR), y el matorral espinoso con espinas laterales perdería el 5.73% (D-DR) y el 4.12% (M-DR). Las zonas agrícolas perderían tan solo el 2.11% (D-DR) y el 1.09% (M-DR), los asentamientos humanos ganarían un 52.11% (D-DR) y un 43.84% (M-DR) y las zonas sin cobertura con suelo degradado ganarían 10.48% (D-DR) y 10.92% (M-DR) (Figuras 21, 22 y 23).

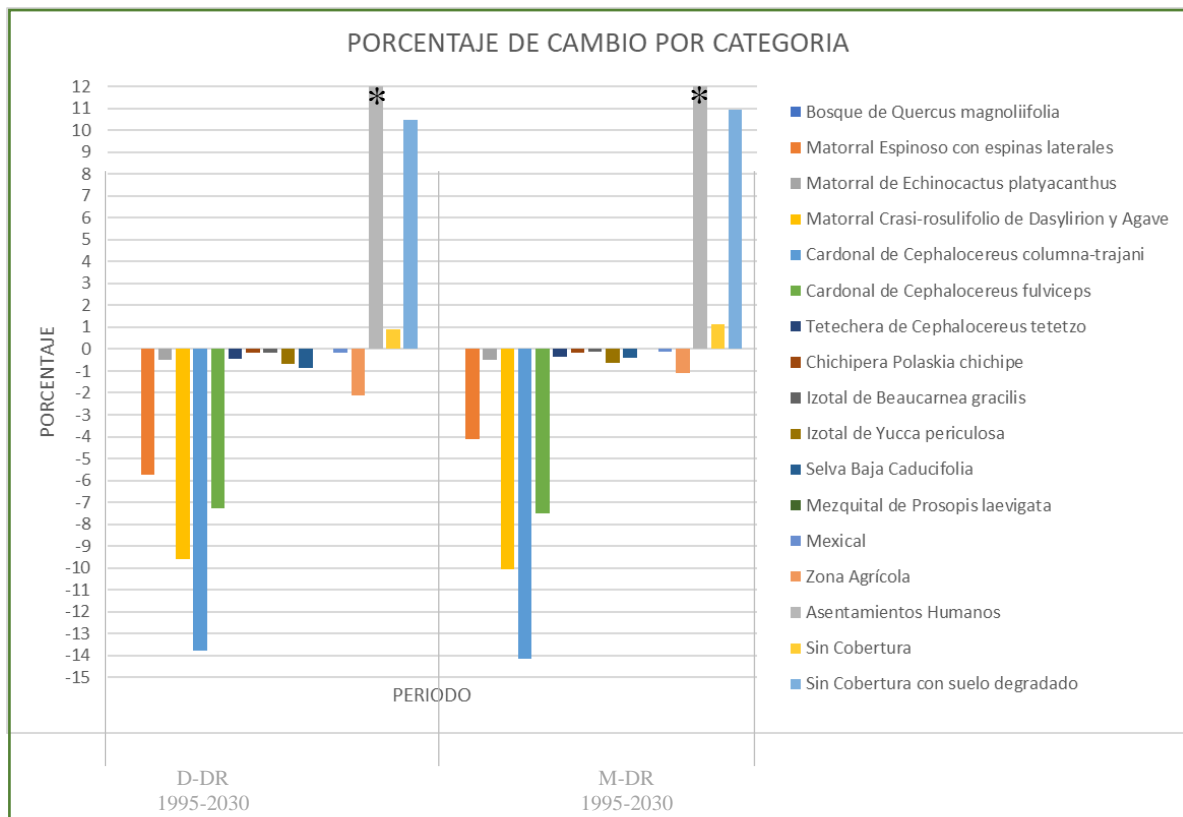


Figura 21. Porcentaje de cambio por clase de CVUT de 1995 a 2030, en los escenarios de derogación (D-DR) y mantenimiento (M-DR) de la RBTC. (*El valor en los asentamientos humanos está truncado para poder representar mejor el resto de las clases).



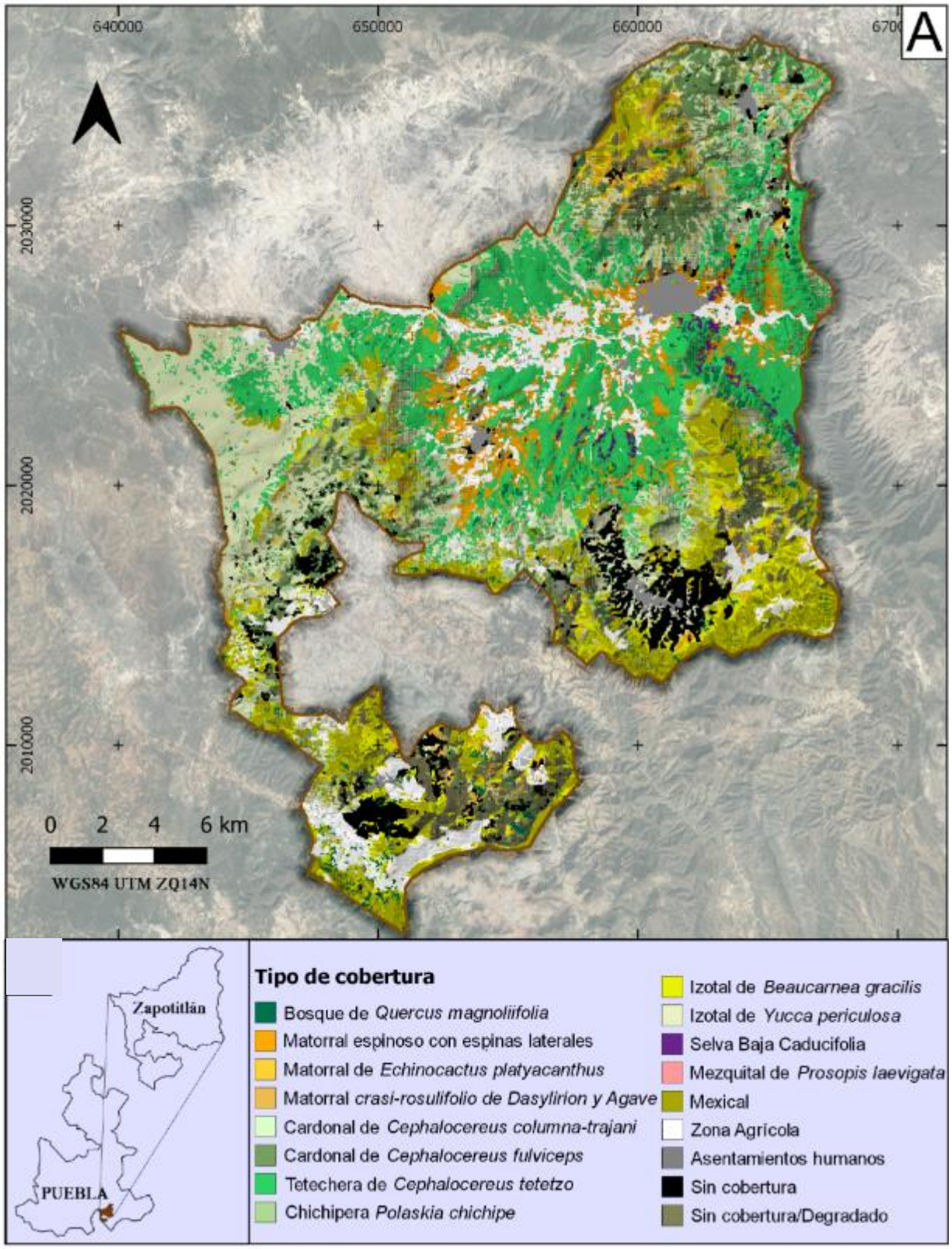
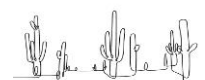


Figura 22. Proyecciones del CCUT al 2030 bajo el escenario de derogación del decreto (D-DR) de la RBTC



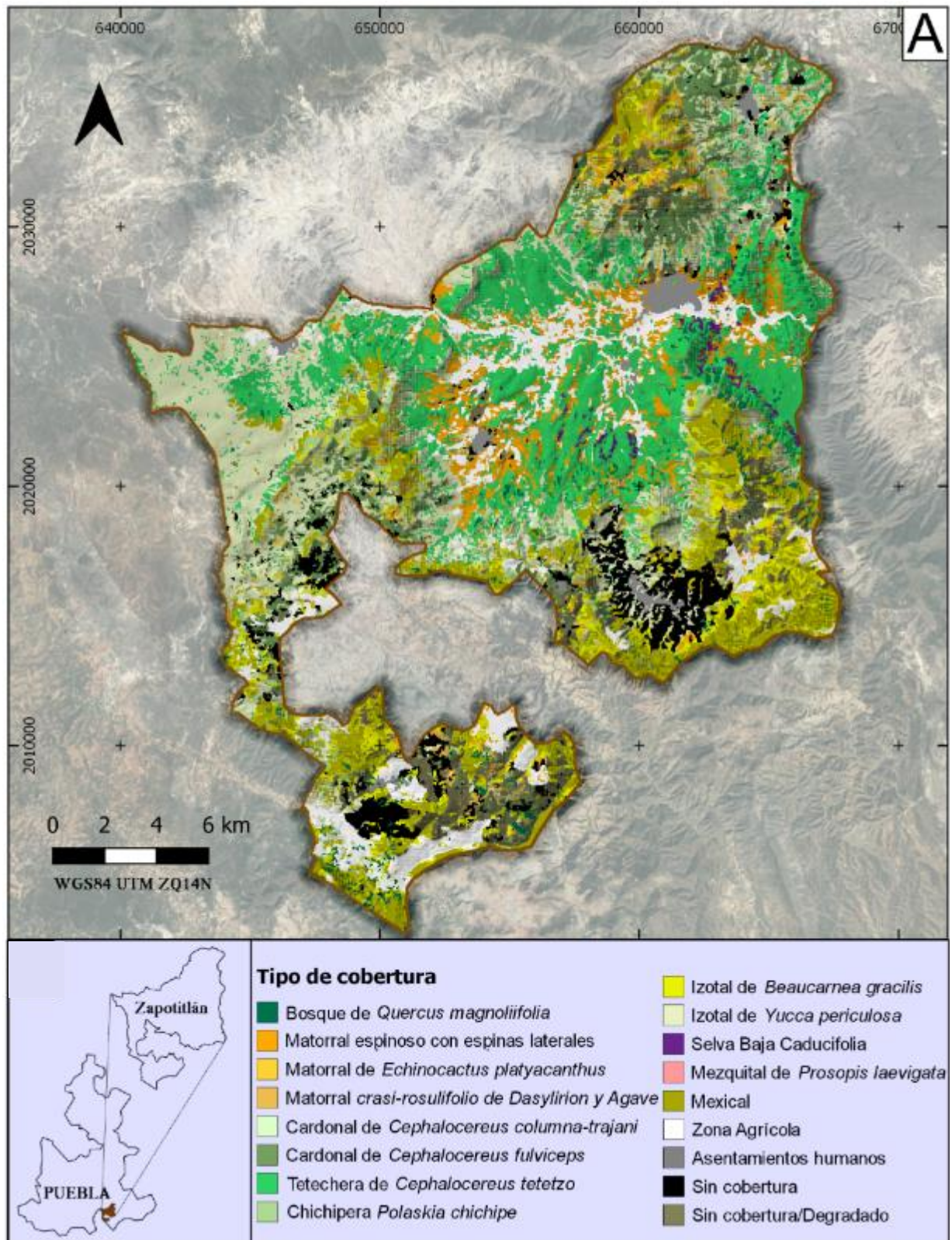
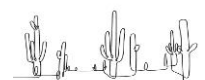


Figura 23. Proyecciones del CCUT al 2030 bajo el escenario de mantenimiento del decreto (M-DR) de la RBTC



Bajo el escenario de derogación del decreto (D-DR), considerando los cambios de superficie desde 1995 a 2030 en una representación normalizada a partir de las áreas totales de cada una de las categorías, la trayectoria observada muestra un patrón de disminución de la superficie del matorral espinoso con espinas laterales, de la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* y de las zonas agrícolas. Se sigue destacando la tendencia en la disminución del cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* y el aumento de los asentamientos humanos (Figura 24).

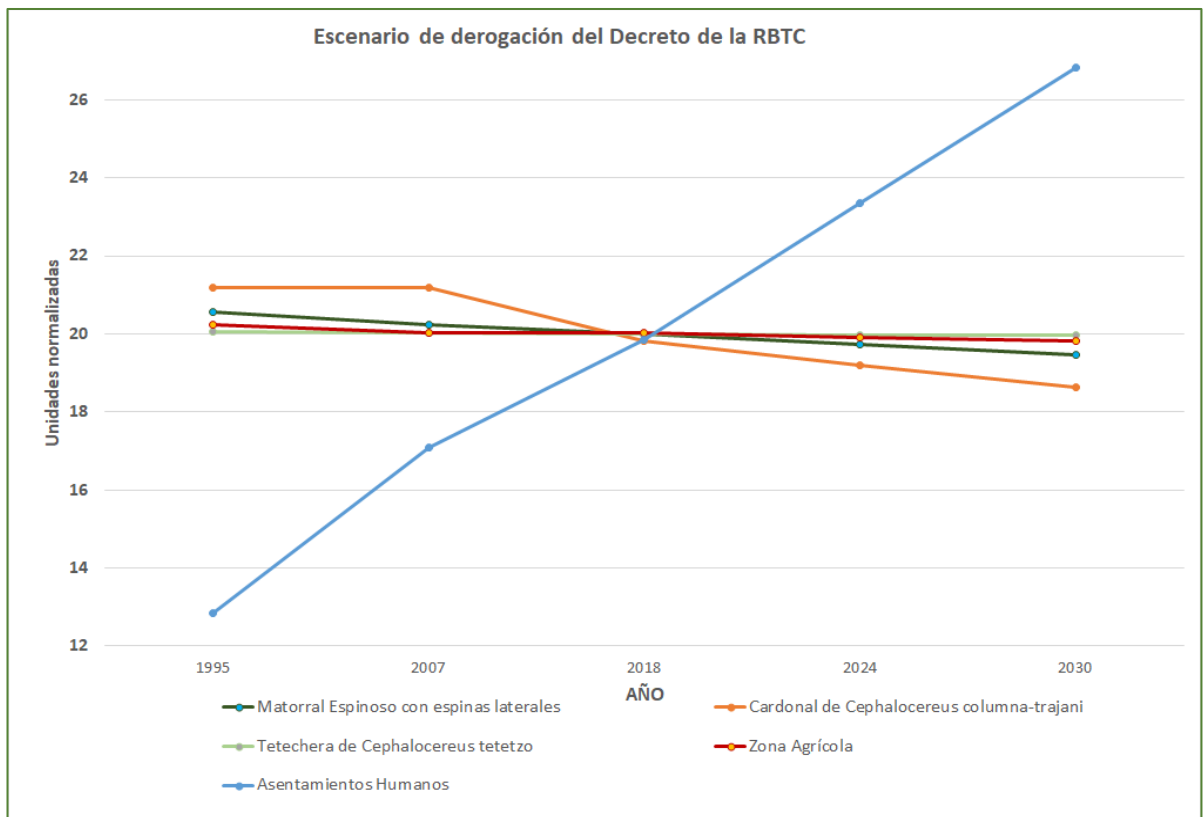
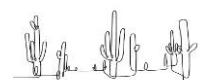


Figura 24. Trayectoria de los cambios entre 1995 y 2030, en el escenario de derogación del Decreto de la RBTC

Por otro lado, en el escenario de mantener el decreto de la RBTC, la proyección a 2024 indica que la superficie total de cobertura vegetal natural sería de 34,272.54 ha y de 34,161.12 ha en el 2030. El matorral espinoso con espinas laterales sería la clase que más superficie perdería quedando con 2,758 ha en 2030. Finalmente, las zonas agrícolas cubrirían 3,840.21 ha en 2030 y los asentamientos humanos pasarían de tener una superficie de 586.26 ha en 2024, a 627.84 ha en 2030 (Cuadro 7).



La trayectoria estimada en este último escenario, considerando los cambios de superficie de 1995 a 2030, en la representación normalizada, presenta un patrón similar, aunque en menor proporción que en el escenario anterior para todas las clases, siendo notoria la disminución en la tendencia de cada clase, incluyendo los asentamientos humanos (Figura 25).

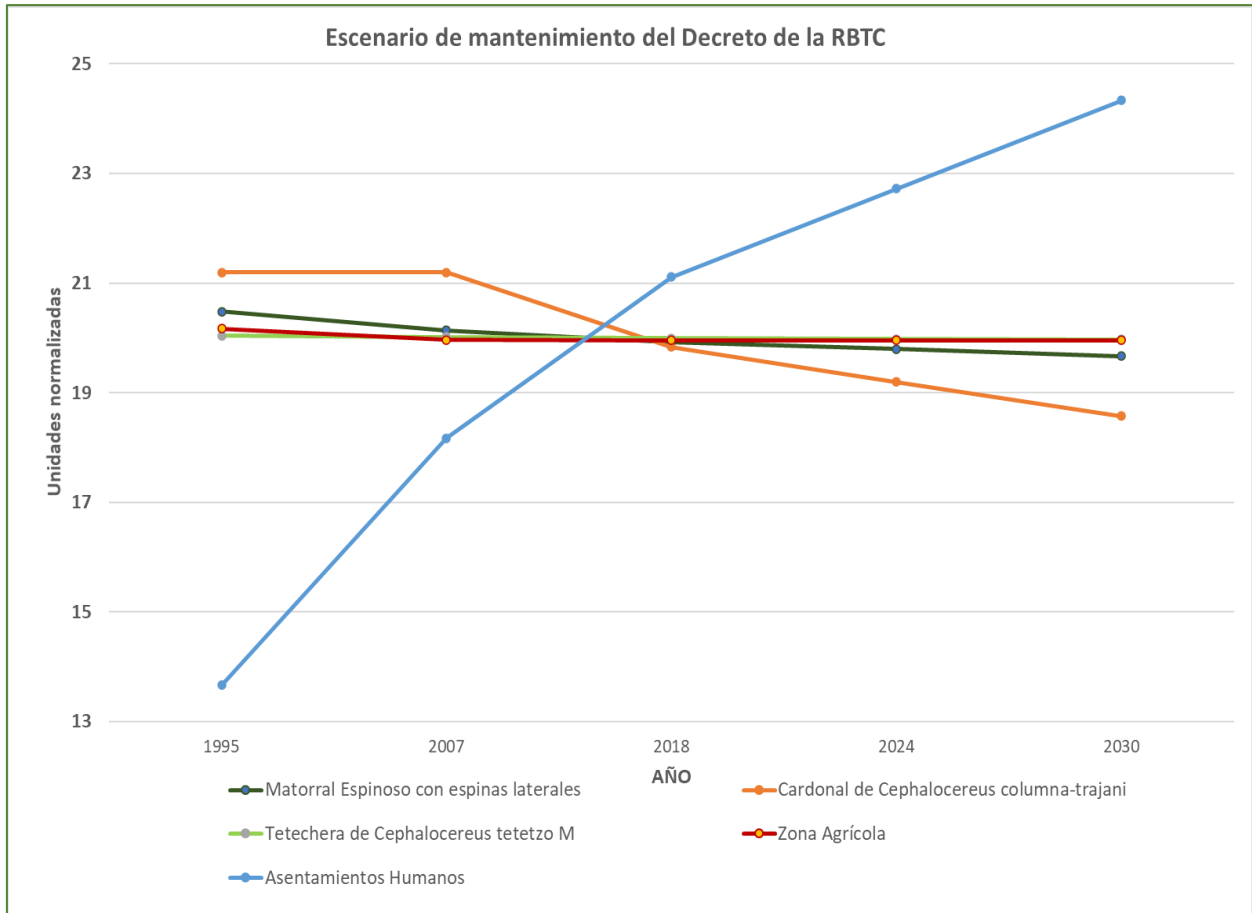
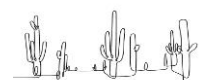


Figura 25. Trayectoria de los cambios entre 1995 y 2030, en el escenario de mantenimiento del Decreto de la RBTC

De manera específica la representación de las trayectorias de cambio por clase, muestra la tendencia que seguirían el matorral espinoso con espinas laterales, el cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*, las zonas agrícolas y los asentamientos humanos, en ambos escenarios, de 1995 a 2030. Se observa, en las tres primeras clases, una tendencia a la disminución en su superficie, siendo mayor, en el escenario de la derogación del decreto. En el caso de los asentamientos humanos la tendencia muestra un incremento, en ambos escenarios, pero en menor proporción, si se mantiene el decreto (Figura 26). Este proceso de expansión urbana se aprecia también en la Figura 27.



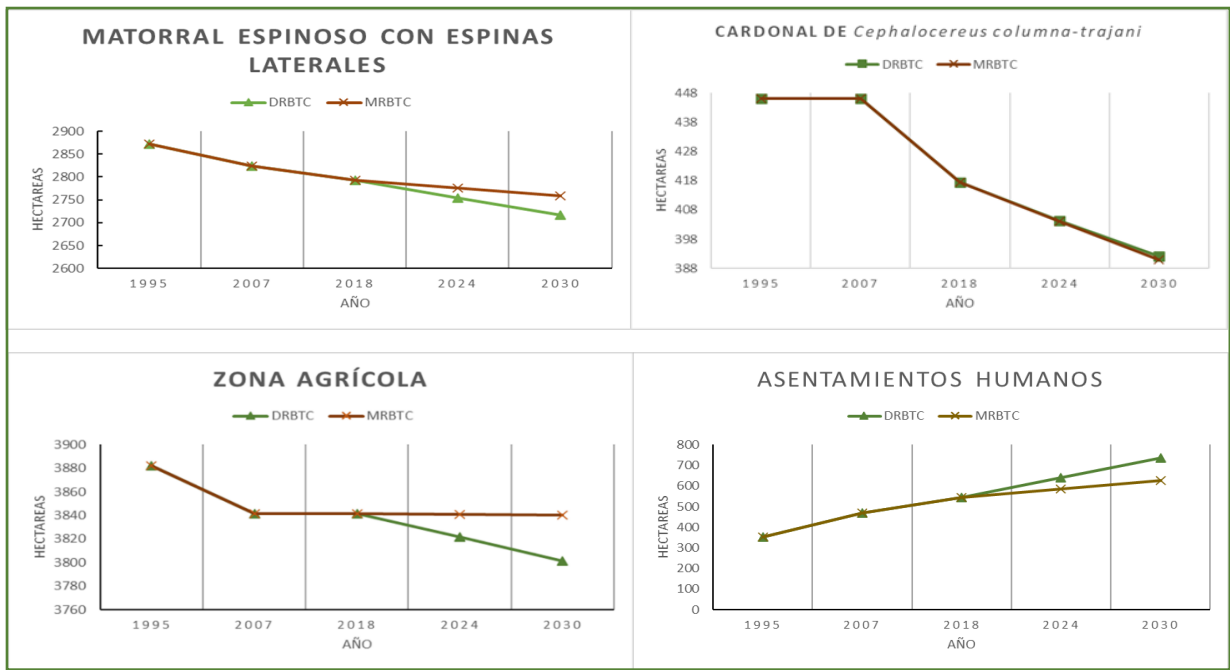


Figura 26. Trayectoria de los cambios de la superficie (hectáreas) de 1995 a 2030, en los escenarios de derogación (D) y mantenimiento (M) del Decreto de la RBTC

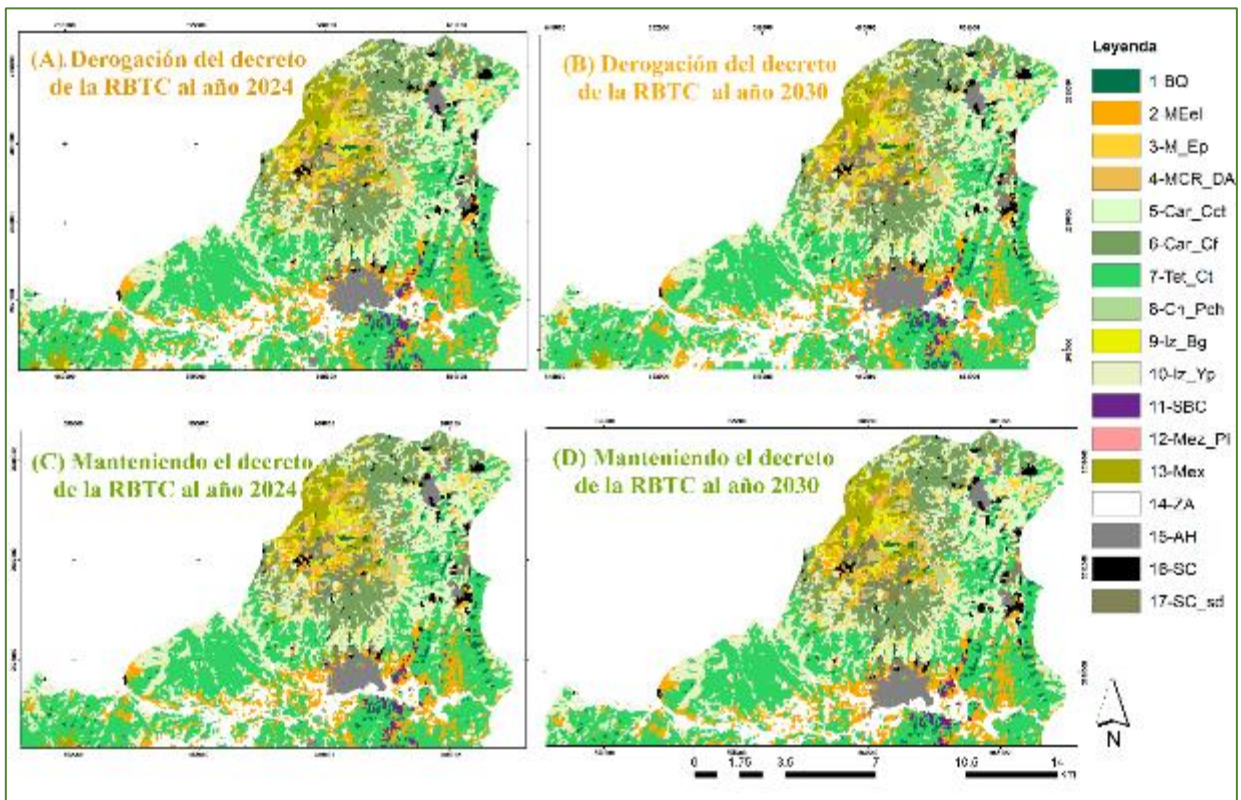
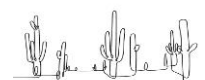


Figura 27. Trayectorias de los cambios al 2024 y 2030, que ilustran el crecimiento de los asentamientos humanos, en los escenarios de derogación (A y B) y mantenimiento del decreto de la RBTC (C y D)



La función de decaimiento constante empleada para la validación de los modelos que simulan las trayectorias de los cambios de cobertura, muestra valores de similitud del 73.35% para el año 2024 y 58.76% para el 2030, con una ventana de 3x3 píxeles; y de 77.71% para el 2024 y 64.92% para el 2030, con una ventana de 5x5 píxeles, para el escenario de derogación del decreto (D-DR) de la RBTC (Figura 28).

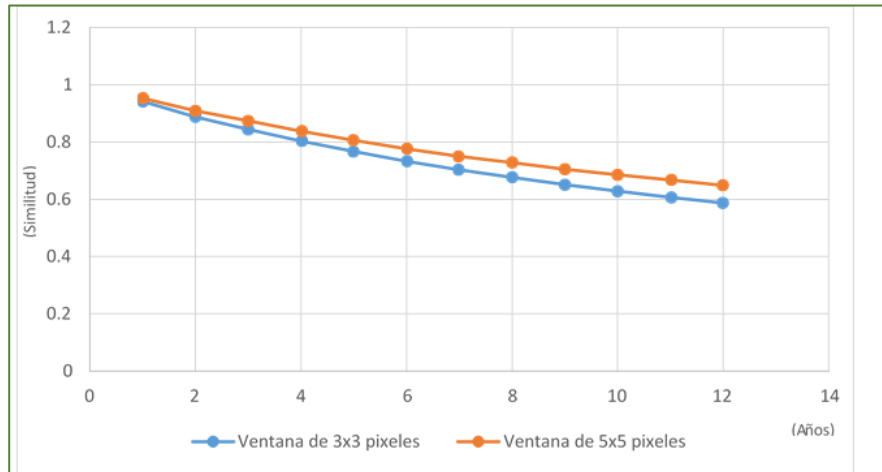


Figura 28. Similitud entre el mapa de cobertura vegetal y uso actual y los modelos generados a 12 años, bajo el escenario de derogación del decreto de la RBTC, usando ventanas de 3x3 y 5x5 píxeles (año 6 = 2024; año 12 = 2030)

En lo que respecta al escenario de mantenimiento del decreto (M-DR), la similitud fue de 73.31% para el 2024 y 58.93% para el 2030, con una ventana de 3x3 píxeles; y de 77.86% para el 2024 y 65.72% para el 2030, con una ventana de 5x5 píxeles (Figura 29).

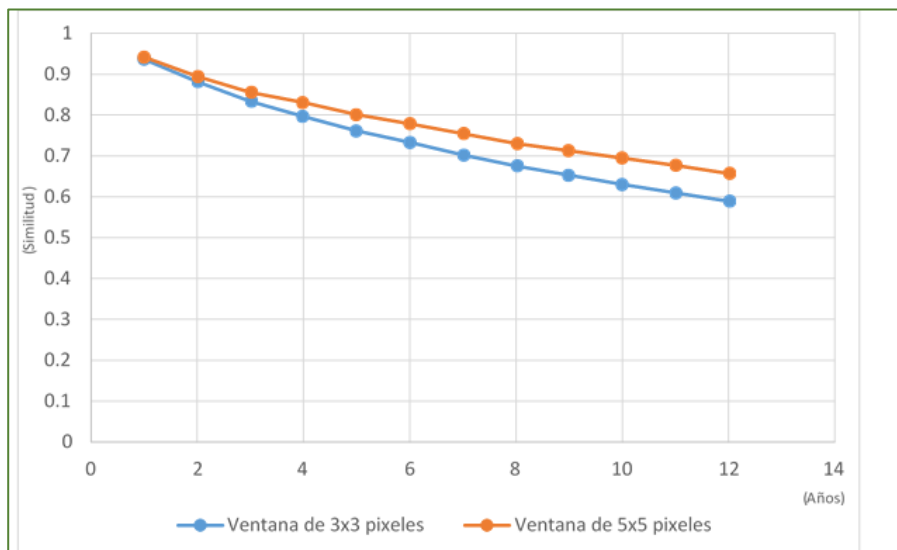
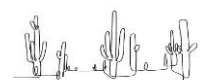


Figura 29. Similitud entre el mapa de cobertura vegetal y uso actual y los modelos generados a 12 años, bajo el escenario de mantenimiento del decreto de la RBTC, usando ventanas de 3x3 y 5x5 píxeles (año 6 = 2024; año 12 = 2030)



7. Discusión

7.1. Distribución actual de la cobertura vegetal y uso del terreno

La flora de Zapotitlán, como todas en el país, es el resultado de procesos biofísicos (climáticos, geológicos y biológicos) (González-Medrano, 2003; Rzedowski, 2006), en interacción con las actividades humanas, que desde hace aproximadamente 12,000 años (McNeish, 1992; Valiente-Banuet et al., 2009) han moldeado un mosaico biocultural (Casas et al., 2014), que a su vez, ha configurado la diversidad de asociaciones vegetales presentes en la región (Miranda y Hernández X., 1963; Valiente et al., 2000, 2009), y que son representadas en este trabajo en un mapa digital con 17 categorías de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) (Figura 4). En el mapa referido, destaca que únicamente el 8.9% del territorio está dedicado a las actividades agrícolas, a pesar de la historia milenaria de actividad agrícola en la región (McAuliffe et al., 2001; MacNeish, 1967), y que el 79.7% presenta cobertura vegetal natural, valor muy cercano a lo reportado por Vallejo et al. (2019), quienes señalan un 85% de mantenimiento de los ecosistemas naturales en las comunidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, al analizar el papel de los sistemas agroforestales como estrategia de conservación de la diversidad biocultural. El bajo porcentaje que cubre la superficie agrícola identificado en el presente estudio está relacionado con la dominancia de un relieve accidentado (Muñoz et al., 2007), que restringe la posibilidad de ampliar la frontera agrícola. Por su parte, el 10.1% del territorio no presenta cobertura vegetal, evidenciando procesos de degradación antrópica en la porción sureste, debido al aprovechamiento de los suelos arcillosos para la producción de cerámica (Arias-Toledo et al., 2000) y a las actividades agrícolas; mientras que en las zonas altas, localizadas en la porción norte, se presentan rasgos de degradación natural (López et al., 2003), ocasionados por la ocurrencia de procesos erosivos y movimientos en masa (Muñoz et al., 2007).

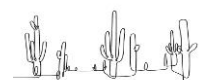
El patrón de distribución de la cobertura vegetal identificado para el municipio a una escala de 1:50,000 (Figuras 4 y 5), coincide de manera general con el de Pérez-Valladares et al. (2019), elaborado a una escala 1:250,000, en lo referente a las clases de vegetación identificadas y al gradiente altitudinal en el que se localizan. Ambos estudios coinciden en reconocer 11 clases, teniendo como diferencias la presencia de la selva baja caducifolia en el primero y del bosque de *Juniperus* en el segundo. Respecto al gradiente altitudinal, en ambos estudios se observa que en las partes más altas (1700-2400 m s.n.m.), se establece el bosque de *Quercus*



asociado con el matorral desértico rosetófilo de *Dasyllirion* y *Agave* y el mexical, seguidos por el cardonal de *Cephalocereus fulviceps* y el matorral de *Echinocactus platyacanthus*, entre los 1700 y 1900 m de altitud, el cardonal de *Cephalocereus columna-trajani* y la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, entre los 700 y 1700 m y el mezquital de *Prosopis laevigata*, a los 1450 m.

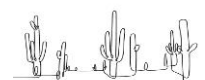
Este patrón de distribución ocurre en forma de parches, formando un mosaico heterogéneo que, en general, sigue un patrón de cambios altitudinales, geomorfológicos y litológicos que delimitan su distribución (Cuadro 1), a pesar de que en muchos sitios las clases de CVUT se encuentran intercaladas (Figura 6). El uso pecuario, principalmente de ganado caprino, se lleva a cabo en todo el municipio, como una actividad que está sujeta a las regulaciones de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán Cuicatlán (SEMARNAT y CONANP, 2013).

La aproximación metodológica para cartografiar la CVUT, permitió corroborar que una de las ventajas de utilizar los modelos de aprendizaje de máquina en la clasificación de imágenes satelitales, es la posibilidad de incorporar a las variables biofísicas como información auxiliar que permite modelar de forma más precisa la distribución de la cobertura del terreno (Ghosh et al., 2014; Kamusoko, 2019), por ser elementos fundamentales para ello (Valiente-Banuet et al., 2009). Lo anterior fue un aspecto crucial, ya que como lo muestran las variables de mayor importancia y el desempeño obtenido por el algoritmo de los bosques aleatorios (Figura 3), la distribución de la cobertura vegetal se encuentra fuertemente influenciada por la precipitación anual y la exposición de laderas. Es de destacarse que tanto la clasificación de INEGI (2017b), como la representación cartográfica de Pérez-Valladares et al (2019) en escala 1:250,000, no reflejan esta variedad geomorfológica y climática específica para el municipio de Zapotitlán. Adicionalmente, la variabilidad espectral registrada por las clases de CVUT en el proceso de visualización, está determinada por los niveles de clorofila y la actividad fotosintética (Manzo-Delgado y Meave, 2003), los cuales están vinculados con la composición de las especies de cada clase. Por tanto, dado que, dos clases de cobertura vegetal con una composición florística similar, pueden presentar la misma respuesta espectral, el uso de sensores remotos de resolución media tiene que ser compensado mediante un exhaustivo trabajo en campo y un enfoque semiautomatizado (Pérez-Valladares et al., 2019, Adams, 2020; Reyes-



Palomeque, 2021), tal como se hizo en esta investigación. No obstante, el uso de imágenes con una resolución espacial de 30 metros es considerado adecuado para representar los objetos del terreno, en una escala de 1:50,000 (Aronoff, 2005). Asimismo, la baja discriminación entre clases, que derivó en su agregación, responde a la alta reflectividad del suelo desnudo que enmascara la respuesta espectral de los parches de vegetación escasa, dificultando su clasificación (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014). Por ello, el uso de los modelos de distribución potencial (Peterson et al., 2011; Phillips et al., 2006), elaborados en la post-clasificación y la evaluación de la certidumbre de cada clase (Cuadro 3), hecha con base en los puntos de verificación (Figura 3), representaron un elemento metodológico importante, pues permitieron diferenciar las clases que habían sido agregadas, y valorar la exactitud de su clasificación (Von Thaden et al., 2020).

La matriz de confusión (Cuadro 3) mostró que aún con la post-clasificación, el mapa final de CVUT presentó una exactitud total del 68%, con un índice de Kappa que es considerado substancial por Pereira e Silva et al. (2020) y moderadamente alto para Ghosh (2014). Este resultado es muy cercano al 69.5% de exactitud total referido por Cheung-Wai y Paleinckx (2008), usando el mismo clasificador para 16 clases; y mayor al 61% reportado por Pérez-Valladares et al. (2019). Sin embargo, dichos resultados son menores respecto a los referidos por otros autores (Ghosh et al., 2014; Holloway y Mangersen, 2018; Xie et al., 2019), quienes han probado diferentes modelos de clasificación de aprendizaje automático en ecosistemas áridos y semiáridos, obteniendo rendimientos altos, en los cuales la sensibilidad (exactitud de usuario) por clase, osciló entre el 81 y el 100% (Pal, 2005; Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014). En el presente trabajo, la sensibilidad alcanzada en cada una de las clases estuvo entre el 29% y 95% (Cuadro 3), variación que está relacionada con el tamaño de la superficie de cada clase (Cuadro 2). En este sentido, las clases con extensiones superiores a las 9,000 ha (tetechera de *Cephalocereus tetetzo* e izotal de *Yucca periculosa*) presentaron valores de sensibilidad superiores al 67%, mientras que las que cubren menos de 4,000 ha (matorral de *Echinocactus platyacanthus* y mezquital de *Prosopis laevigata*), presentaron valores por debajo del 34%. La excepción fue la selva baja caducifolia, que registró una exactitud del 82%, pero sólo se encuentra en 241.7 ha del territorio, lo cual puede deberse a que en la primera fase de la clasificación, esta clase se agregó con la de tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, que es la segunda de mayor distribución en el territorio (9,129 ha). Por lo anterior, el hecho de que el

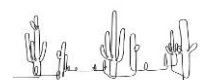


90.7% del municipio presente clases de CVUT con porcentajes medios a altos de píxeles correctamente ubicados en su clase, permite señalar que la mayor parte del territorio fue clasificado con un nivel de certidumbre óptimo.

Por otro lado, la alta especificidad registrada en todas las clases (Cuadro 3), aunada a la baja sensibilidad de aquellas con menor extensión, indican las dificultades que tuvo el algoritmo de los bosques aleatorios para diferenciar los límites entre ellas. Esto se reafirma por el hecho de que el número de verdaderos positivos por clase, es decir el número de píxeles correctamente clasificados, siempre fue mayor al de los falsos positivos, es decir, los píxeles mal clasificados (Congalton y Green, 2019) (Cuadro 3). Lo anterior implica que, si bien el mapa puede tener limitaciones en el 10.1% de la superficie del municipio, debido a la baja sensibilidad en algunas de las clases, su distribución y localización puede ser tomada como punto de referencia, siempre y cuando, la geometría de sus límites sea mejorada para generar información confiable (Von Thaden et al., 2020), empleando técnicas que permitan un trabajo más detallado, como la interpretación visual de imágenes de mayor resolución, obtenidas mediante el uso de vehículos no tripulados (drones) o de satélites comerciales. Sin embargo, su adquisición puede representar una limitación económica (Pérez-Valladares et al., 2019; Von Thaden et al., 2020) y un cierto grado de incertidumbre en cuanto a su disponibilidad temporal, pues no siempre los programas satelitales prevalecen en el tiempo, a diferencia del programa LANDSAT, que ha estado en funcionamiento desde los años 70 (Franco, 2017) y que es de libre acceso.

7.2. Distribución de la cobertura vegetal y uso del terreno en 1995 y 2007

Las superficies que ocupan las clases de CVUT en 1995 y 2007 son muy similares, aunque se identificaron algunas variaciones, que evidentemente indican un proceso de transformación del territorio, motivo de interés de esta investigación. Estas variaciones corresponden a las clases de cobertura vegetal dominantes, la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, los izotales de *Yucca periculosa* y *Beaucarnea gracilis*, pero también al matorral espinoso con espinas laterales, al cardonal de *C. fulviceps*, las zonas agrícolas, los asentamientos humanos, y las áreas sin cobertura, que serán discutidas en el apartado de patrones de cambio de CCUT.

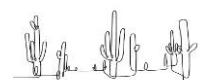


7.3. Patrones de cambio de cobertura y uso del terreno

El análisis exploratorio realizado utilizando la cartografía de INEGI (1985-2014), mostró una reducción considerable en las tasas de cambio, en fechas posteriores al decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC). El ligero incremento en la tasa de cambio anual identificada entre 2011 y 2014, podría atribuirse a la desagregación de las clases entre la serie V (2011) y la VI (2014). En la presente investigación se encontró el mismo patrón de disminución de la tasa anual en los dos períodos evaluados, sin embargo, las tasas obtenidas en la presente investigación fueron mayores respecto a las obtenidas con la cartografía de las series de uso y vegetación del INEGI. Lo anterior puede estar relacionado con el hecho de que la escala de la cartografía generada en este trabajo fue a 1:50,000, mientras que la de INEGI, es 1:250,000; por lo que únicamente podemos tomar sus datos como un referente.

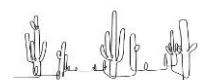
La pérdida de cobertura vegetal natural en Zapotitlán evidencia procesos de deforestación, al haberse modificado 285.8 ha en los 23 años de análisis (Cuadro 6), lo que implica una transformación del 19.42%, con tasas de pérdida anuales de 2.02% (1995 a 2007) y de 1.7% (2007 a 2018). Estos resultados son superiores a los encontrados por Figueroa et al. (2009), quienes refieren en el análisis hecho de 1993 a 2002, con cartografía en escala 1:250,000, que una gran proporción de las reservas de la biósfera mexicanas que estudiaron, mostró una buena capacidad para disuadir los procesos CCUT, encontrando valores de área transformada menores al 5%. De igual modo, la tasa de superficie transformada obtenida en esta investigación que es de 2.02%, es mayor al 0.14% reportado para la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán por Figueroa et al. (2011). La razón más evidente de la divergencia de los datos es la diferencia de escalas con las que se llevaron a cabo los estudios. En el caso contrario, los resultados obtenidos en el presente trabajo son menores respecto al 30.4% de pérdida de cobertura vegetal natural que Leija et al. (2020) reportan en el análisis del cambio de cobertura vegetal y uso del terreno de la cuenca del Río Nazas, con un 26% de transformación del matorral xerófilo y una tasa anual del 2%.

En el análisis de cambios de superficie por clase de cobertura y uso del terreno, en el primer período evaluado las zonas agrícolas perdieron 40.5 ha y después del decreto de la Reserva de la Biósfera, la pérdida registrada es mínima (Cuadro 6), sin haber tenido ganancia.



Esto puede relacionarse con las condiciones biofísicas del territorio que no favorecen la expansión agrícola y evidentemente con las restricciones impuestas por el decreto (DOF, 1998). El territorio destinado a la producción agrícola en Zapotitlán, tiene su origen en los sitios que fueron aprovechados desde tiempos prehistóricos para el desarrollo de prácticas agrícolas en la región, pues de acuerdo con MacNeish (1992) y Valiente-Banuet et al. (2009) en el Valle de Tehuacán se encontraron restos que demuestran la presencia de grupos humanos desde hace aproximadamente 12 000 años que domesticaron el maíz, el frijol, la calabaza y otros cultivos. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, no hay evidencias de un proceso de expansión de la frontera agrícola en el territorio de Zapotitlán, debido a las condiciones biofísicas prevalecientes, particularmente la escasez de agua y a los bajos niveles de producción, lo que ha llevado a los productores a mantener la misma superficie agrícola y a continuar con las prácticas de manejo tradicional que han heredado (Comisariado de Bienes Comunales de Zapotitlán Salinas, Puebla, comunicación personal, octubre 2019).

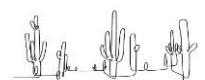
Es decir, aunque la agricultura es una de las principales actividades productivas en el Valle de Tehuacán Cuicatlán (Casas et al., 1997; Paredes-Flores et al., 2007; Vallejo et al., 2019), en el 2018, apenas cubre el 8.9% del territorio de Zapotitlán. Las zonas agrícolas colindan o son cercanas a las áreas de cardonal de *Cephalocereus fulviceps*, matorral espinoso con espinas laterales, matorral crasi-rosulifolio de *Dasyliirion* y *Agave*, cardonal de *C. columna-trajani*, tetechera de *C. tetetzo*, e izotales de *Yucca periculosa* y *Beaucarnea gracilis*. Por lo que es importante resaltar que, no obstante que estas asociaciones vegetales se encuentran en zonas de baja pendiente, con suelos fértiles, y cercanas a una fuente de agua, como refieren Vallejo et al. (2019), pero también a los asentamientos humanos, el análisis de CCUT no evidencia un proceso de deforestación para convertir dichas clases de cobertura vegetal natural, a terrenos de producción agrícola. Lo anterior tampoco se identificó en las porciones planas de los cerros en donde se cultiva el maguey (*Agave atrovirens*) y existen corrales de ganado caprino de libre pastoreo, que se van rotando entre los terrenos cada determinado tiempo, con el objeto de fertilizar el suelo para el cultivo del maguey (Paredes-Flores et al., 2007). De manera complementaria, cabe mencionar que el registro de un número tan elevado de especies en las zonas agrícolas, sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado (Hernández-Moreno et al., en prensa) está asociado a la variación entre la composición florística y la estructura de la vegetación del paisaje, en relación con el gradiente ambiental y geográfico de la región, que



presenta límites difusos (González-Medrano, 2003). Por esta razón los límites entre las zonas agrícolas y la vegetación natural son difíciles de identificar, aunque el área destinada a la producción agrícola en el municipio está bien definida.

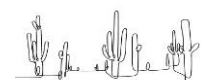
El incremento en la superficie de los asentamientos humanos y las zonas sin cobertura con suelo degradado, indican procesos de urbanización y degradación los cuales afectan a las clases de cobertura vegetal natural antes referidas, por su colindancia y cercanía. Evidencia de ello es la transición identificada entre las zonas agrícolas y los asentamientos humanos, en el periodo comprendido entre 1995 y 2007 (Figura 13) . En esta etapa se evidencia el efecto positivo y de mayor peso que tienen la distancia a los caminos y a las zonas urbanas existentes para que el proceso de urbanización ocurra (Quiroz, 2019). Otro ejemplo del proceso de degradación que se identifica es el que se observa en la transición entre el cardonal de *C. columna-trajani* y las zonas sin cobertura con suelo degradado, en el período de 2007-2108 (Figura 16) . En este caso, el tipo de suelo, la distancia a los caminos y a los asentamientos humanos fueron las variables que mayor peso tuvieron para provocar este proceso (Orr, 2017), ya que los Leptosoles son suelos delgados y muy pedregosos, por lo que son muy susceptibles a la degradación (López et al., 2003).

Como ya se refirió antes, la tetechera de *C. tetetzo* es la clase con mayor superficie de distribución, sin embargo, perdió poca superficie (20.25 ha) (Cuadro 6), lo que representa el 0.22% de su superficie original (Figura 10), mostrando tasas de cambio neta y anual muy bajas (Figuras 12 y 15). La estructura y morfología particular de la tetechera de *C. tetetzo*, nos permite señalar que caracteriza a Zapotitlán. Además, esta clase tiene una gran importancia ecológica, pues al coexistir con diversas especies de fauna, como aves y murciélagos y otras plantas, se mantienen las interacciones bióticas como la polinización, la dispersión de semillas, y el nodricismo (Casas et al., 2008; Valiente-Banuet et al., 2000). Por su colindancia con el izotal de *Y. periculosa* y el matorral espinoso con espinas laterales, que son una fuente de recursos forestales no maderables de recolección (Paredes-Flores et al., 2007), y por su cercanía con la cabecera municipal, es importante preservar los mecanismos que favorezcan su mantenimiento y conservación.



Los cardonales de *C. fulviceps* y *C. columna-trajani* son otras de las asociaciones vegetales distintivas de la región, debido a las formas arborescentes de las cactáceas columnares que los dominan. La primera asociación fue la que perdió mayor superficie (90.9 ha) (Cuadro 6), lo cual representa el 3.57% de su superficie original (Figura 10), con tasas de cambio neta y anual menores a 1%, que son consideradas muy bajas (Figuras 12 y 15). Por su parte, el cardonal de *C. columna-trajani* perdió menos superficie (28.71 ha), sin embargo, su tasa de cambio fue mayor en el período posterior al decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (2007-2018). De acuerdo con Casas et al. (2008), las zonas de distribución donde dominan estas especies, así como las tetecheras, han sido utilizadas para el pastoreo de cabras, siendo los individuos de las especies del estrato arbustivo y herbáceo, los que reciben el impacto directo. Asimismo, se ha documentado que la gente recolecta algunas partes de estas especies tales como las flores y los frutos con fines alimenticios, los tallos para la construcción y las partes muertas como leña. Esto ha llevado a que los pobladores de la zona realicen prácticas de manejo *in-situ* de las poblaciones vegetales, lo cual implica mantener en pie a los individuos, con la intención de conservarlos (Casas et al., 2008).

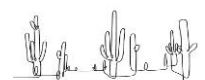
La chichipera de *Polaskia chichipe* también forma parte de los bosques de cactáceas columnares, que apenas perdió 1.17 ha (Cuadro 6), lo cual representa el 0.09 % de su superficie original (Figura 10), con tasas de cambio neta y anual extremadamente bajas (Figuras 12 y 15). A diferencia de las clases anteriores, la chichipera ha sido aprovechada y manejada de forma distinta por los pobladores de la región, pues su superficie fue desmontada para abrir tierras agrícolas, en un proceso de conversión de la cobertura del terreno, con las consecuentes alteraciones del ecosistema (Plieninger y Schaar, 2008). Asimismo, la gente ha realizado un proceso de selección de individuos de *P. chichipe* con características favorables, para ser reproducida vegetativamente (Casas et al., 2008), en combinación con los sistemas de producción agrícola de especies domesticadas, como el maíz y el frijol, lo cual constituye un sistema agroforestal de importancia económica y de conservación de la biodiversidad (Moreno-Calles et al., 2010; Vallejo et al., 2019). Bajo este contexto, la chichipera es una de las clases que se ha visto menos afectada por procesos asociados al cambio de cobertura y uso del terreno, en el período evaluado, y en el marco de la aproximación de paisaje en la que se trabajó.



Como agrupación de plantas arbustivas sin espinas perennifolias, el mexical perdió 2.79 ha (Cuadro 6), lo cual representa el 0.07% de su superficie original (Figura 10), con tasas de cambio neta y anual mínimas (Figuras 12 y 15). Esta asociación ha sido motivo de estudio por su importancia ecológica y origen biogeográfico, ya que comparte un origen y características similares al de otras regiones del mundo con clima mediterráneo (Valiente-Banuet et al., 1998, 2010; Verdú et al., 2002). Estos autores han encontrado que la floración del mexical ocurre en verano para maximizar el uso eficiente del agua y que el 93% de las especies que lo conforman presentan una orientación de las hojas entre 45° y 90° con respecto al eje horizontal, para evitar una mayor exposición solar; lo cual sugiere condiciones de estrés hídrico. Está dominado por especies esclerófilas, las cuales en áreas medianamente perturbadas, han sido substituidas por las palmas *Brahea nitida* y *B. dulcis*, con componentes rosetófilos (Campos-Salas et al., 2016), transformándose en una comunidad secundaria (Quiroz, 2009).

De los matorrales dominados por arbustos espinosos, el matorral espinoso con espinas laterales perdió 79.2 ha (Cuadro 6), que representa el 2.84% de su superficie original (Figura 10), con tasas de cambio neta de 2.76% y 1.1% en cada período (Figuras 12 y 15). Los matorrales con espinas laterales son considerados una comunidad vegetal secundaria (Miranda y Hernández-X., 1963), lo cual indica que, en algún momento, en Zapotitlán ocurrió un proceso de conversión (Batunacun et al., 2018; Plieninger y Schaar, 2008), a partir de un tipo de cobertura vegetal primario como la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*. Esta conversión ocurrió previo al período de análisis de este trabajo. No obstante lo anterior, es una asociación vegetal que provee de gran cantidad de recursos vegetales que son utilizados con fines medicinales, alimenticios y para leña, además de ser en donde se establecen los potreros para la crianza del ganado (Paredes-Flores et al., 2007). En la transición identificada de esta clase hacia la zona agrícola, entre 1995 y 2007 (Figura 14), aunque presenta una tasa neta baja (2.76%), se evidencia un proceso de deforestación (Quiroz, 2009) debido al efecto positivo de la cercanía con los caminos y los asentamientos humanos y la presencia de suelos con altos contenidos de materia orgánica que suponen niveles de fertilidad adecuada.

Por su parte, el matorral de *Echinocactus platyacanthus* perdió apenas 1.08 ha (Cuadro 6), lo cual representa el 0.24% de su superficie original (Figura 10), con tasas de cambio neta y anual poco significativas (Figuras 12 y 15). Es una comunidad vegetal de importancia



fisonómica y ecológica para el Valle de Tehuacán, cuya especie representativa está clasificada como vulnerable por el UICN (1983) y figura como amenazada en la NOM-059-ECOL-2001 (Jiménez-Sierra et al., 2007). Por ello es necesario tener una localización espacial precisa de esta asociación vegetal, pues a pesar de que es fácil de identificar por el tamaño de los individuos adultos de la especie dominante, la cobertura tan dispersa de los elementos que la componen, provocan una respuesta espectral que se confunde con la de otros tipos de asociación vegetal como el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*. Por esta razón, al clasificar la imagen satelital, ambas clases se agregaron en una sola en la primera clasificación. Sin embargo, el proceso de postclasificación permitió su discriminación. Además, al ser colindante con el izotal de *Yucca periculosa*, en donde se llevan a cabo actividades de recolección y pastoreo (Paredes-Flores et al., 2007), el matorral de *E. platyacanthus* puede estar sujeto al paso continuo de personas y ganado, representando un riesgo, pues cabras y burros se alimentan del tallo vivo, las flores y los frutos (Jiménez-Sierra y Eguiarte, 2010). No obstante, no se identificó un proceso importante de transformación de esta clase, asociada con el CCUT, al nivel escalar del trabajo.

Dentro de la vegetación arbolada de las zonas bajas, el izotal de *Yucca periculosa* también está ampliamente distribuido en el municipio, el cual es un tipo de cobertura vegetal que tradicionalmente ha sido aprovechado para la extracción de su fibra, así como el consumo de sus inflorescencias, hojas y tallos (Arias-Toledo et al., 2000). En el análisis llevado a cabo, se observó que esta asociación vegetal perdió 29.52 ha (Cuadro 6), lo cual representa el 0.33% de su superficie original (Figura 10), con una tasa extremadamente baja (Figuras 12 y 15), a pesar de que se distribuye en zonas de poca pendiente y en suelos fértiles, y es fácil acceder a los sitios donde se le encuentra. Esto puede deberse a que, en localidades como San Juan Raya, las autoridades comunitarias han establecido reglas para su aprovechamiento, que incluyen: 1) la prohibición para extraer individuos en el mismo sitio por dos años consecutivos, 2) la definición de un tamaño y edad mínima de los individuos extraíbles y 3) la prohibición de extracción durante una temporada específica, con la finalidad de evitar daños a las plantas o a las poblaciones (Casas et al., 2008).

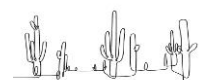
El izotal de *Beaucarnea gracilis*, es una asociación vegetal que también da identidad a la zona de trabajo. Existen estimaciones que indican que algunos individuos de la especie



dominante pudieran tener hasta 800 años de edad, por lo que se considera la más longeva de la región (Arias-Toledo et al. 2000). Esta especie es altamente apreciada en los mercados, lo que ha propiciado su extracción ilegal, no obstante los esfuerzos, tanto regionales como comunitarios, por evitarlo. Asimismo, sus poblaciones se han visto afectadas por procesos de modificación de la cobertura vegetal (Batunacun et al., 2018; Plieninger y Schaar, 2008), para el establecimiento de palmares de *Brahea dulcis* y *B. nítida* con fines de aprovechamiento artesanal, en diferentes puntos del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Casas et al., 2008). Sin embargo, tampoco se identificó un cambio importante en su superficie en el período de análisis (Cuadro 6, Figuras 12 y 15). De manera particular, se ha hecho un esfuerzo importante para conservar esta asociación vegetal en la localidad Colonia San Martín, hoy San Martín del Valle, en donde se preserva una superficie de izotal de *Beaucarnea gracilis* desde hace 30 años, a partir de una iniciativa local de protección y conservación de dicho espacio, denominado “El santuario de los sotolines”. Actualmente dicho espacio es aprovechado en el marco de un proyecto local de turismo de naturaleza, el cual es controlado y administrado por un comité comunitario de turismo que es regulado por una representación de la asamblea local, en la que participan la autoridad municipal y los comisionados de bienes comunales (Miembro del Comité de Turismo de San Martín del Valle, comunicación personal, 9 de agosto, 2018).

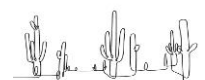
La selva baja caducifolia es una comunidad vegetal de gran importancia ecológica por su alta diversidad y endemismos (Camargo-Ricalde et al., 2003). Además es importante desde el punto de vista económico, por ser fuente para la obtención de diversos recursos alimenticios y medicinales (Paredes-Flores et al., 2007). Su distribución es muy reducida, aunque se le encuentra por arriba de los 1700 m.s.n.m y hasta la cima de algunos cerros como el Cutá (Valiente-Banuet et al., 2009). Probablemente, debido a estas condiciones, tampoco se identificaron procesos importantes de conversión o modificación de esta clase, asociados con el CCUT.

El mezquital de *Prosopis laevigata* también presentó una superficie de distribución mínima, pues al encontrarse en los sitios de más fácil acceso, que son más cercanos a los asentamientos humanos y que se desarrollan sobre suelos aluviales muy profundos y fértiles, se puede inferir que su área de distribución fue convertida a tierras agrícolas, desde tiempos antiguos (MacNeish, 1992; Valiente-Banuet et al., 2009). Sin embargo, la poca superficie de



terreno en donde se distribuye esta clase ha sido mantenida para su aprovechamiento, debido a que es una comunidad vegetal que ofrece diversos recursos, y se utiliza para múltiples propósitos. En Zapotitlán, la especie que caracteriza a esta asociación vegetal es conocida como mezquite, la cual es utilizada como combustible, forraje para el ganado caprino y como tutor para la producción de pitahaya (*Hylocereus undatus*), una cactácea con un alto valor económico (Paredes-Flores et al., 2007). Además, el mezquite es hospedero de una chinche llamada cocopache (*Thasus gigas*) que es consumida a nivel local (Arias-Toledo et al., 2000).

El cambio de cobertura y uso del terreno tiene múltiples impactos en los bienes y servicios ecosistémicos a diversas escalas espaciales y temporales. Las causas subyacentes que se desarrollan en el contexto social y económico promueven, desde ese ámbito, la realización de diversas actividades (causas proximales) que convierten y/o modifican la cobertura vegetal (Figura 24). En el análisis hecho entre 1995 y 2018 se identificaron principalmente procesos de conversión, que implican un reemplazamiento de un tipo de cobertura por otro (Etter et al., 2006; Giri et al., 2003; Ridell et al., 2005). En especial se observó que el matorral espinoso con espinas laterales, la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, el cardonal de *C. fulviceps* y el izotal de *Y. periculosa* fueron reemplazados por los asentamientos humanos, evidenciando un proceso de urbanización, relacionado principalmente con variables como la distancia a las zonas urbanas y a las zonas agrícolas, así como al tipo de suelo. Lo anterior indica que el proceso de modelación que se fundamenta en un análisis de los cambios pasados, permite estimar las tasas de cambio entre los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso del suelo y su relación espacial entre la localización de dichos cambios y las variables que influyen sobre su distribución espacial (Mas y Flamenco-Sandoval, 2011).



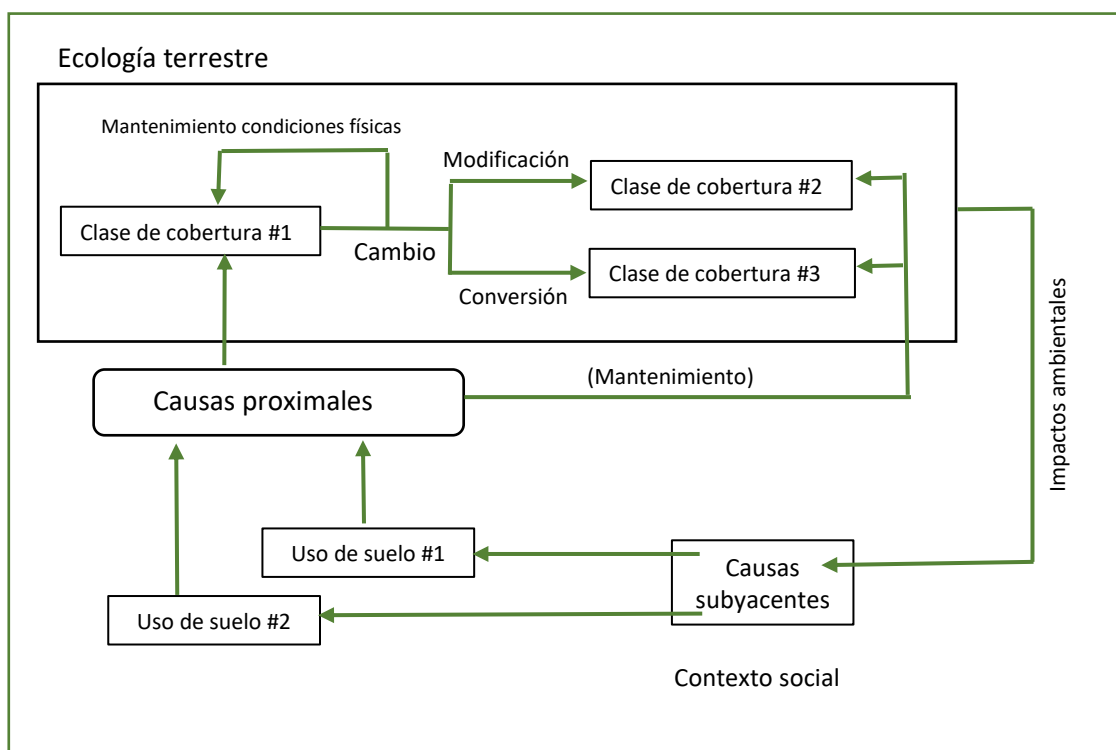


Figura 30. Relación entre el uso del terreno y las formas de transformación de la cobertura del terreno (Geist et al., 2006).

7.4. Proyecciones del cambio de cobertura y uso del terreno al 2024 y el 2030

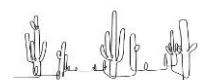
En el escenario hipotético en que el decreto de la RBTC fuera derogado, las proyecciones a 6 y 12 años (2024 y 2030), indican que se presentaría una mayor pérdida de la cobertura vegetal natural; no obstante, el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*, el cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*, y el de *C. fulviceps*, perderían un poco más si el decreto se mantuviera, aunque, la diferencia es mínima. Esto implicaría un proceso de deforestación incipiente, que afectaría a las clases de cobertura vegetal de importancia ecológica y económica para la zona.

Analizando la tendencia de crecimiento de los asentamientos humanos, en la proyección a 6 y 12 años, se observa que el proceso de transformación de mayor impacto sería la urbanización (Quiroz, 2009), con un efecto mayor en el escenario de derogación del decreto de la Reserva de la Biósfera. Es decir, el crecimiento urbano no se va a evitar, pero estaría más limitado, si se mantiene el decreto. Otro proceso que se detectó con este análisis es la conversión de las zonas agrícolas a urbanas, que evidencian un proceso de permanencia antrópica (Quiroz, 2009).



Respecto a la validación de las proyecciones de los cambios, los valores ofrecidos por la función de decaimiento indican que los modelos obtenidos para 2024 y 2030, en ambos escenarios (derogación y mantenimiento del decreto de la RBTC), muestran un nivel óptimo de compatibilidad entre el escenario simulado y el real (Macedo et al., 2013). Por tanto, se considera que la simulación de la trayectoria de los cambios, bajo el método empleado, es adecuada.

Bajo este contexto, los resultados encontrados, nos permiten resaltar la importancia del mantenimiento de la Reserva de la Biósfera, como una estrategia de conservación de la diversidad biológica (Halffter et al., 2015), pudiendo afirmar que, el CCUT no representa, para Zapotitlán, una amenaza en los esfuerzos de conservación, ni un riesgo importante sobre la estructura y funcionamiento de sus ecosistemas. Además, el enfoque metodológico propuesto en este trabajo ofrece los mecanismos para la generación de conocimiento sistemático sobre la dinámica socioambiental en una zona de gran complejidad cultural y social, el cual es muy necesario para la planificación y definición de estrategias de manejo y conservación, que se sostienen en el mantenimiento de la cobertura vegetal nativa (Figuroa et al., 2009).



8. Conclusiones

Este estudio ha permitido en primera instancia, alcanzar el objetivo prioritario de identificar espacialmente la distribución de la cobertura vegetal y las actividades de origen humano del municipio de Zapotitlán, hasta un tercer nivel de agregación, integrando la composición de especies, en un mapa digital conformado por 17 categorías de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) en escala 1:50,000.

Fue elaborada la cartografía de la distribución de la cobertura vegetal y el uso del terreno para el municipio de Zapotitlán, integrando la relación espacial que hay entre las actividades productivas, el aprovechamiento de los recursos vegetales y la distribución espacial de las asociaciones vegetales, lo cual es una base importante para entender cómo se ha presentado el proceso de modificación o conversión de la cobertura del terreno.

El contar con la cartografía digital de la CVUT de Zapotitlán, permitirá disponer de una base espacial actualizada para el desarrollo de proyectos de diversa naturaleza, especialmente los relacionados con la planeación territorial y el manejo integral de los ecosistemas, considerando la conservación de áreas prioritarias, el aprovechamiento sustentable y la recuperación de zonas degradadas. Particularmente en las zonas degradadas es conveniente considerar la implementación de acciones puntuales que permitan el regreso de la vegetación, entre ellas la introducción de especies nativas y obras que promuevan el equilibrio de las pendientes con fajas de vegetación o bien, costales de arena.

Se logró identificar, cuantificar, analizar y modelar la transformación de la cobertura y uso del terreno que ha sufrido el municipio de Zapotitlán en un período de 23 años, identificando principalmente procesos de conversión de una clase a otra, aunque con tasas de cambio considerablemente bajas.

En el análisis hecho entre 1995 y 2018 se identificaron principalmente procesos de conversión, que implican un reemplazamiento evidente de un tipo de cobertura a otro, principalmente de algunas clases de cobertura vegetal natural como el matorral espinoso con espinas laterales, la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, el cardonal de *C. fulviceps* y el izotal de



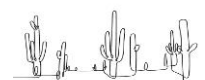
Y. periculosa hacia los asentamientos humanos; evidenciando que el principal proceso asociado al CCUT, es la urbanización.

El mismo patrón se identificó en la modelación de las trayectorias de los cambios, bajo los escenarios de derogación y mantenimiento del decreto de la RBTC al 2024 y 2030; siendo el crecimiento urbano el principal proceso que ocurriría en el municipio, en ambos escenarios. Sin embargo, se identificó una tendencia en el cardonal de *C. columna-trajani*, a sufrir un proceso de degradación de bajo impacto, en el escenario de mantenimiento del decreto.

Lo anterior nos lleva a concluir que el municipio de Zapotitlán, Puebla presenta un porcentaje de cobertura vegetal natural menor en la actualidad que antes del decreto de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán. Sin embargo, la tendencia de las superficies y tasas de cambio, no es significativa en términos de la superficie total del área de estudio y del patrón de comportamiento identificado para cada una de las clases.

No obstante que los CCUT identificados en el presente trabajo podrían ser considerados mínimos en la escala de paisaje, sería importante evaluar el impacto que puede estar ocurriendo sobre las especies de algunas asociaciones vegetales que se encuentran bajo presión de uso, situación que amerita la realización de estudios más detallados.

En el contexto del marco actual de colaboración digital global, en el que existe una fuerte tendencia para compartir de manera libre la información generada en proyectos específicos, no sólo a partir de publicaciones científicas, sino además de bases de datos y procedimientos que se ponen a la disposición de la comunidad de usuarios (investigadores, planificadores, tomadores de decisiones, etc). El presente trabajo aporta una línea base para el establecimiento de un sistema de monitoreo de los patrones de CCUT a nivel local, que puede llevarse a cabo, tomando en consideración la ruta metodológica desarrollada, la cual propone un proceso semi-automatizado para la clasificación de imágenes de satélite, el uso de software libre y datos existentes y disponibles en internet para la modelación del fenómeno, que permite incorporar variables explicativas.

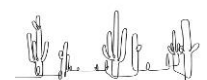


9. Referencias bibliográficas

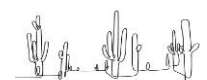
- Adams, B., Iverson, L., Matthews, S., Peters, M., Prasad, A. y Hix, D. M. (2020). Mapping forest composition with Landsat time series: An evaluation of seasonal composites and harmonic regression. *Remote Sensing*, 12:610. <http://doi.org/10.3390/rs12040610>
- Aldalur, B. y Santamaría, M. (2002). Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 17:31–42. <http://www.aet.org.es/revistas/revista17/AET17-04.pdf>
- Arias-Toledo A. A., Valverde, V. M. T. y Reyes, S. J. (2000). *Las plantas de la región de Zapotitlán Salinas*. México, D. F.: SEMARNAP
- Aronoff, S. (2005). *Remote sensing for GIS managers*. Redlands, California, EUA: Environmental Systems Research.
- Bai, Z., Dent, D. (2009). Recent Land Degradation and Improvement in China. *Journal of the Human Environment*, 38(3):150–156. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-38.3.150>
- Balthazar, V., Vanacker, V., Molina, A., y Lambin, E. F. (2015). Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecological Indicators*, 48:63–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.043>
- Basupi, L. V., Quinn, C. H. y Dougill, A. J. (2017). Using participatory mapping and a participatory geographic information system in pastoral land use investigation: Impacts of rangeland policy in Botswana. *Land Use Policy*, 64:363–373. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.007>
- Batunacun, C., Nendel, H., Yunfeng, H., Lakes, T. (2018). Land-use change and land degradation on the Mongolian Plateau from 1975 to 2015 a case study from Xilingol, China. *Land Degradation and Development*, 29:1595–1606. <https://doi.org/10.1002/ldr.2948>
- Breceda, S. A., Castorena, D. L. y Maya, D. Y. (2012). Transformaciones de una selva seca por actividades humanas en el paisaje rural de Baja California Sur, México. *Investigación Ambiental*, 4(1):141–150. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1390/1/PUB-ARTICULO-1702.PDF>
- Camacho-Olmedo, M. T., Paegelow, M., Mas, J. F. y Escobar, F. (2018). Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. An Introduction. En M. T. Camacho-Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas y F. Escobar. (Eds.), *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 1–8). Cham, Switzerland: Springer.



- Camacho-Sanabria, J. M., Juan, P. J. I., Pineda, J. N. B., Cadena, V. E. G., Bravo, P. L. C. y Sánchez, L. M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1):93–112. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100008
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J.M., Juan P. J. I., Balderas, P. M.A., Sánchez, L. M. (2017). Cambios de cobertura/uso del suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, 23(3):39–60. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712017000300039
- Camargo-Ricalde, S. L., Dhillion, S. S. y Jiménez-González, C. (2003). Mycorrhizal perennials of the “matorral xerófilo” and the “selva baja caducifolia” communities in the semiarid Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Mycorrhiza*, 13:77–83. [doi:10.1007/s00572-002-0203-8](https://doi.org/10.1007/s00572-002-0203-8)
- Campbell, M., Congalton, R., Hartter, J. y Ducey, M. (2015). Optimal land cover mapping and change analysis in northeastern Oregon using Landsat imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81:37–47. <https://doi.org/10.14358/pers.81.1.37>
- Campos-Salas, N., Casas, A., Moreno-Calles, A. I. y Vallejo, M. (2016). Plant management in agroforestry systems of rosetophyllous forests in the Tehuacán Valley, Mexico. *Economic Botany*, 70(3):254–269. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12231-016-9352-0>
- Casas, A., Caballero, J., Mapes, C. y Zárate, S. (1997). Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 61, 31–47. [doi:10.17129/botsoci.1537](https://doi.org/10.17129/botsoci.1537)
- Casas, A., Rangel-Landa, S., Torres, I., Pérez-Negrón, E., Solís, L., Parra, F., Delgado, A., Blancas, J., Farfán-Heredia, B. y Moreno-Calles, A. I. (2008). In situ management and conservation of plant resources in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, México: an ethnobotanical and ecological approach. En: U. P. De Albuquerque, M. Alves-Ramos (Eds.), *Current topics in Ethnobotany* (pp. 1–25). Keral: Research Signpost.
- Casas, A., Camou, A., Otero-Arnaiz, A., Rangel-Landa, S., Cruse-Sanders, J., Solís, L., Torres, I., Delgado, A., Moreno-Calles, A. I., Vallejo, M., Guillén, S., Blancas, J., Parra, F., Farfán-Heredia, B., Aguirre-Dugua, X., Arellanes, Y. y Pérez-Negrón, E. (2014). Manejo tradicional de biodiversidad y ecosistemas en Mesoamérica: el Valle de Tehuacán. *Investigación Ambiental*, 6:23–44. <https://www.researchgate.net/publication/314090302>



- Casas, A., Lira, R., Torres, I., Delgado, A., Moreno-Calles, A. I., Rangel-Landa, S., Blancas, J., Larios, C., Solís, L., Pérez-Negrón, E., Vallejo, M., Parra, F., Farfán-Heredia, B., Arellanes, Y. y Campos, N. (2016). Ethnobotany for sustainable ecosystem management: a regional perspective in the Tehuacán Valley. En R. Lira, A. Casas y J. Blancas (Eds), *Ethnobotany of Mexico* (pp. 179–206). New York, New York: Springer.
- Cheung-Wai, Ch. J. y Paellinckx, D. (2008). Evaluation of random forest and adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112:2999–3011.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.011>
- Chilar, J. y Jansen, L. J. (2001). From land cover to land use: a methodology for efficient land use mapping over large areas. *Professional Geographer*, 53:275–289.
<https://doi.org/10.1111/0033-0124.00285>
- Chowdhury, R. R. (2006). Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography*, 26:129–152. doi:10.1016/j.apgeog.2005.11.004
- Cobos, M. E., Townsend, P. A., Barve, N. y Osorio-Olvera, L. (2019). Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *Peer J*, 7:e6281
<https://peerj.com/articles/6281/>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2020). Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Recuperado el 8 de abril, 2020 de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONANP (Comisión de Áreas Naturales Protegidas) y FMCN (Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C.). (2003). *Estimación de la tasa de transformación del hábitat en la Reserva de la Biósfera “Tehuacán-Cuicatlán” periodo 1986–2000*. México, D. F.: CONANP.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2011). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010*. Consejo Nacional de Población. México.
- Congalton, R. G. y Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices*. 3a ed. Boca Raton, FL. CRC Press.
- Congedo, L. (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>



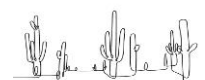
- Corona-Núñez, R. O. (2008). *Dinámica espacio-temporal de los conductores sociales, políticos y económicos de la deforestación y de los cambios de uso/cobertura del suelo a escala local en el bosque tropical caducifolio del sur de Oaxaca, México*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México.
- Cortina, V. H. S. (2007). *Uso del suelo y deforestación en los Altos de Chiapas*. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez, V. O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J. y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34:2427–2437. doi:10.1002/joc.3848
Recuperado el 24 abril, 2020 de:
<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.3848>
- Dávila, P., Arizmendi, M. C., Valiente-Banuet, A., Villaseñor, J. L., Casas, A y Lira, R. (2002). Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 11:421–442.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1998). Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de Reserva de la Biósfera, la región denominada Tehuacán-Cuicatlán en los estados de Oaxaca y Puebla. 18 de septiembre de 1998. México.
- Dupuy-Rada, J. M., González, I. J. A., Iriarte, V. S., Calvo, I. L. M., Espadas, M. C., Tun-Dzul, F., Dorantes, E. A. (2007). Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas*, 62:104–124. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112007000100007
- Duraisamy, V., Bendapudi, R. y Jadhav, A. (2018). Identifying hotspots in land use land cover change and the drivers in a semi-arid region of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190:535. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6919-5>
- EIONET (European Topic Centre on Land Use and Spatial Information). (2020). Recuperada el 02 junio, de 2020 de: <https://inspire.ec.europa.eu/theme/lc>
- Espinosa-Mendoza, V. (2016). Dinámica Ego: una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis de CCUS. *Colegio de Geógrafos del Perú*, 1–20. <http://cgp.org.pe/web/b3-08/>



- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S. y Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114:369–386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para la clasificación correlación y comunicación internacional. Informe sobre recursos mundiales de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Figuroa, F., Sánchez-Cordero, V., Meave, J. A. y Trejo, I. (2009). Socioeconomic context of land use and land cover change in Mexican biosphere reserves. *Environmental Conservation*, 36:180–191. doi:10.1017/S0376892909990221
- Figuroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., y Linaje, M. (2011). Evaluation of protected area effectiveness for preventing land use and land cover changes in Mexico. Is an index good enough? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3):951–963. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.768>
- Foley, J. A., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowsky, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Eucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. y Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309:570–574. DOI: 10.1126/science.1111772
- Franco, R. (2017). *Composiciones LANDSAT en ArcGis. Guía Básica*. México, D. F. Recuperado el 12 abril, 2020 de <http://mixdyr.wordpress.com>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México, D. F.: Instituto de Geografía UNAM.
- Geist, H. J. y Lambin, E. F. (2004). Dynamic Causal Patterns of Desertification. *BioScience*, 54(9):817–829. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0817:DCPOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0817:DCPOD]2.0.CO;2)
- Geist, H. J., McConnell, W., Lambin, E. F., Moran, E., Alves, D. y Rudel, T. (2006). Causes and Trajectories of Land-Use/CoverChange. En E. F. Lambin y H. J. Geist (Eds.), *Land-Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. (pp. 41–70). Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Ghosh, A., Sharma, R. y Joshi, P. K. (2014). Random forest classification of urban landscape using Landsat archive and ancillary data: Combining seasonal maps with decision level fusion. *Applied Geography*, 48:31–41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.003>



- Giri, Ch., Defourny, P. y Shrestha, S. (2003). Land cover characterization and mapping of continental Southeast Asia, using multi-resolution satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21):4181–4196. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139827>
- González-Medrano, F. (2003). *Las comunidades vegetales de México*. México, D. F.: INE-SEMARNAT.
- González-Medrano, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México, D. F.: INE-SEMARNAT.
- Guevara, S. (2018). *Un nuevo patrimonio mundial el Valle de Tehuacán - Cuicatlán: hábitat originario de Mesoamérica*. Instituto Nacional de Ecología, México. Recuperado el 03 de marzo, 2020: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/transparencia-inecol/17-ciencia-hoy/800-un-nuevo-patrimonio-mundial-el-valle-de-tehuacan-cuicatlan-habitat-originario-de-mesoamerica>
- Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), 235–249. <https://doi.org/10.1080/13658810210157822>
- Hagen-Zanker, A., Straatman, B. y Uljee, I. (2005). Further developments of a fuzzy set map comparison approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(7), 769-785. <https://doi.org/10.1080/13658810500072137>
- Hagen-Zanker, A. (2009). An improved Fuzzy Kappa statistic that accounts for spatial autocorrelation. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(1), 61–73. <https://doi.org/10.1080/13658810802570317>
- Halfpeter, G., C. Tinoco-Ojanguren, L. I. Íñiguez-Dávalos y A. Ortega-Rubio. (2015). La investigación científica y las Áreas Naturales Protegidas en México: una relación exitosa. En: Ortega-Rubio, A., M. J. Pinkus-Rendón e I. C. Espitia-Moreno (Editores). *Las Áreas Naturales Protegidas y la Investigación Científica en México* (pp. 3–18). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C., La Paz B. C. S., Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Hernández-Moreno, M. M., Téllez-Valdés. O., Martínez-Meyer, E., Islas-Saldaña, L., Salazar-Rojas, V. M. y Macías-Cuéllar, H. (En prensa). Distribución de la cobertura vegetal y del uso del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*.



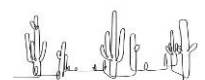
- Heywood, V. H. (1954). El concepto de asociación en las comunidades rupícolas. *Anales Instituto Botánico A. J. Cavanilles*, 11:463–481.
- Hole, F. (2009). Drivers of unsustainable land use in the semi-arid Khabur River Basin, Syria. *Geographic Research*, 47(1):4–14. <https://doi.org/10.1111/j.1745-5871.2008.00550.x>
- Holloway, J. y Mangelsen, K. (2018). Statistical machine learning methods and remote sensing for sustainable development goals: a review. *Remote Sensing*, 10:1–21. <https://doi.org/10.3390/rs10091365>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1992). *Continuo nacional de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, serie I*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1999). *Mosaico de ortofotos digitales, E14B75b,c,d,e,f y E14B85a,b,c,d. Resolución de 2 metros*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2001). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie II*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2002). *Conjunto de datos geológicos vectoriales E1406, escala 1:250 000, serie I*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2003). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie III*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1:250 000, serie II*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010a). *Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por Localidad (ITER)*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie IV*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.



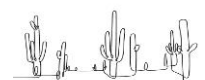
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica, escala 1:50 000, serie III*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie III*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017a). *Guía para interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000. Serie VI*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI*. México, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jansen, L. J. M. y Di Gregorio, A. (2002). Parametric Land Cover Classification and Land Use Classification as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 91:89–100. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00243-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00243-2)
- Jiménez-Sierra, C. L., Mandujano, M. C. y Eguiarte, L. E. (2007). Are populations of the candy barrel cactus (*Echinocactus platyacanthus*) in the desert of Tehuacán, Mexico at risk? Population projection matrix and life table response analysis. *Biological Conservation*, 135:278–292. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.10.038>
- Jiménez-Sierra, C. L. y Eguiarte, L. E. (2010). Candy barrel cactus (*Echinocactus platyacanthus* Link & Otto): A traditional plant resource in Mexico subject to uncontrolled extraction and browsing. *Economic Botany*, 64(2):99–108. <https://doi.org/10.1007/s12231-010-9119-y>
- Kamusoko, C. (2019). *Remote Sensing Image Classification in R*. Springer Geography. <http://doi.org/10.1007/978-981-13-8012-9>
- Keys, E. y McConell, W.J. (2005). Global change and the intensification of agriculture in the tropics. *Global Environmental Change*, 15:320–337. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.04.004>
- Lambin, E. F., Turner II, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homehood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Xiubin, L. I., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrisnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, A., Vogel, C. y Jianchu, X. U. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global*



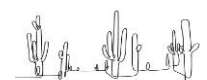
- Environmental Change*, 11(4):261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Lambin, E.F., Geist, H.J. y Lepers, A. (2003). Dynamics of Land-Use and Land Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28:205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lambin, E. F. (2005). Conditions for sustainability of human-environment systems: Information, motivation and capacity. *Global Environmental Change*, 15(3):177–180. <http://the-eis.com/elibrary/sites/default/files/downloads/literature/Conditions%20for%20sustainability%20of%20human-environment%20systems.pdf>
- Lambin, E. F. y Geist, H. J. (2006). *Land-Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Leija-Loredo, E. G., Reyes-Hernández, H., Reyes-Pérez, O., Flores-Flores, J. L. y Sahagún-Sánchez, F. J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 22(1):125–140. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100125
- Leija, E. G., Valenzuela-Ceballos, S. I., Valencia-Castro, M., Jiménez-González, G., Castañeda-Gaytán, G., Reyes-Hernández, H. y Mendoza, M. E. (2020). Análisis de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región centro-norte de México. El caso de la cuenca baja del río Nazas. *Ecosistemas*, 29:1826. <http://doi.org/10.7818/ECOS.1826>
- Lesschen, J. P., Verburg, P. H. y Staal, S. J. (2005). *Statistical methods for analyzing the spatial dimension of changes in land use and farming systems*. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC). Report Series 7. The International Livestock Research Institute, Kenya and LUCC Focus 3 Office, The Netherlands.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. y Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Lira, R., Casas, A., Rosas-López, R., Paredes-Flores, M., Pérez-Negrón, E., Rangel-Landa, S., Solís, L., Torres, I., y Dávila, P. (2009). Traditional knowledge and useful plant richness in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Economic Botany*, 63(3):271–287. <https://doi.org/10.1007/s12231-009-9075-6>
- Liu, J. Y. y Deng, X. Z. (2010). Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC. In *Chinese Science Bulletin*, 55(14):1354–1362. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0733-y>



- López, G.E., Mendoza, M.E., Bocco, G., Acosta, A. (2006). Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central México. *Agricultural Systems*, 90:62-78. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.001>
- López, G. F., Muñoz, I. D., Hernández, M. M., Soler, A. A., Castillo, L. C., Hernández, A. I. (2003). Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVI-1:19-41.
- Macedo, R. D. C., Almeida, C. M. D., Santos, J. R. D. y Rudorff, B. F. T. (2013). Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19(2), 313–337. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=393937730009>
- MacNeish, R.S. (1967). A summary of the subsistence. En D. S. Byers (Ed.), *The prehistory of the Tehuacan Valley, volume one Environment and Subsistence* (pp. 290–331). London, Great Britain: University of Texas Press.
- MacNeish R. S. (1992). *The origins of agriculture and settled life*. Norman y Londres: University of Oklahoma Press.
- Manzo-Delgado, L. y Meave, J. A. (2003). La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota. *Revista Ciencia*, 54(3):18–28. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/54_3/vegetacion_vista_espacio.pdf
- Mapedza, E., Wright, J. y Fawcett, R. (2003). An investigation of land cover change in Mafungautsi Forest, Zimbabwe, using GIS and participatory mapping. *Applied Geography*, 23:1–21. doi:10.1016/S0143-6228(02)00070-X
- Mas, J. F. (2005). Change estimates by map comparison: A method to reduce erroneous changes due to positional error. *Transactions in GIS*, 9(4):619–629. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00238.x>
- Mas, J.F., A. Velázquez y S. Couturier. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1): 23–39. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/La_evaluacion_de_los_cambios_de_cobertura-uso_de_suelo_en_la_Republica_Mexicana.pdf



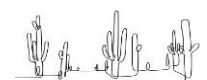
- Mas, J. F. y Flamenco-Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*, 5 (1)1:1–24.
http://www.geotropico.org/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf
- Mas, J. F., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M. T. y Houet, T. (2014a). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51:94e111
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Mas, J. F., Pérez-Vega, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. O. y Vega, E. (2014b). A Suite of Tools for Assessing Thematic Map Accuracy. *Geography Journal*, 2014:10
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/372349>
- McAuliffe, J. R., Sundt, P. C., Valiente-Banuet, A., Casas, A. y Viveros, J. L. (2001). Pre-columbian soil erosion persistent ecological changes and collapse of a subsistence agricultural economy in the semi-arid Tehuacan Valley Mexico's 'Cradle of Maize'. *Journal of Arid Environments*, 47:47–75. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0691>
- McCusker, B. y Carr, E. R. (2006). The co-production of livelihoods and land use change: Case studies from South Africa and Ghana. *Geoforum*, 37:790-804.
<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2005.09.007>
- Miranda, F. y Hernández-X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28:29–179.
- Montaño, A. N. M., García-Sánchez, R., Ochoa-de la Rosa, G. y Monroy-Ata, A. (2006). Relación entre la vegetación arbustiva, el mezquite y el suelo de un ecosistema semiárido en México. *Terra Latinoamericana*, 24:193–205.
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108006.pdf>
- Montaño, A. N. M. y Monroy, A. (2000). Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*, XXVI, 26–37.
- Moreno-Calles, A., Casas, A., Blancas, J., Torres, I., Maser, O., Caballero, J., García-Barrios, L., Pérez-Negrón, E. y Rangel-Landa, S. (2010). Agroforestry systems and biodiversity conservation in arid zones: the case of the Tehuacán Valley, Central México. *Agroforestry Systems*, 80(3):315–331. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9349-0>
- Mottet, A. Ladet, S., Coqué, N. y Gibo, A. (2006). Agricultural land-use change and its drivers in mountain landscapes: A case study in the Pyrenees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114:296–310. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.017>



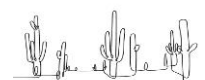
- Muñoz, I. D. J., Horta, P. G., López, G. F., Hernández, M. M. y Soler, A. A. (2007). El Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla: Marco geográfico regional. En: M. C. Arizmendi, G. Ávila, F. López, M. Murguía, S. Rodríguez y S. Solórzano (Eds), *Deterioro ambiental en zonas áridas. Diez años de experiencia multidisciplinaria* (pp. 21–35). Tlalnepantla, México: FES Iztacala, UNAM.
- Muñoz, I. D. J., López, F., Hernández, M. M., Soler, A. A. y López, G.J. (2008). Impacto de la pérdida de la vegetación en las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*, 27:237–246. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-57792009000300008&lng=es&nrm=iso
- Orr, B. J, Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. y Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2019-06/LDN_CF_report_web-english.pdf
- Overmars, K. P. y Verburg, P. H. (2005). Analysis of land use drivers at the watershed and household level: Linking two paradigms at the Philippine forest fringe. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2):125–152. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713380>
- Owar-Othow, O., Legesse-Gebre, S., y Obsi-Gemeda, D. (2017). Analyzing the Rate of Land Use and Land Cover Change and Determining the Causes of Forest Cover Change in Gog District, Gambella Regional State, Ethiopia. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000219>
- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26:217–222. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>
- Paredes-Flores, M., Lira, S. R. y Dávila, A. P. (2007). Estudio etnobotánico de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Acta Botánica Mexicana*, 79:13–61. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512007000200002
- Paudel, B., Zhang, Y. L., Li, S. C., Wu, X. y Khanal, N. R. (2016). Review of studies on land use cover change in Nepal. *Journal of Mountain Science*, 13(4):643–660. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3604-9>



- Pelorusso, R., Leone, A., Boccia, L. (2009). Land cover and land use change in the Italian central Apennines: A comparison of assessment methods. *Applied Geography*, 29(1):35–48. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.07.003>
- Pereira e Silva, L., Campos, X. A. P., Marques da Silva, R. y Guimaraes, S. C.A. (2020). Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 21:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00811>
- Pérez-Valladares, C. X., Velázquez, A., Moreno-Calles, A. I., Mas, J. F., Torres-García I., Casas, A., Rangel-Landa, S., Blancas, J., Vallejo, M. y Téllez-Valdés, O. (2019). An expert knowledge approach for mapping vegetation cover based upon free access cartographic data: the Tehuacan-Cuicatlan Valley, Central Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 28:1361–1388. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01723-w>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araujo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pineda, J. N. B., Bosque, S. J., Gómez, D. M. y Plata, R.W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69:33–52. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200004
- Plieninger, T. y Schaar, M. (2008). Modification of land cover in a traditional agroforestry system in Spain: processes of tree expansion and regression. *Ecology and Society*, 13(2):25. <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art25/>
- Pontius R. G. Jr., Huffaker, D. y Denman, K. (2004). Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, 179:445–491. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010>
- Priego-Santander, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). Propuesta para la generación automatizada de unidades de paisaje, fundamentos y métodos. México. D. F.: SEMARNAT, CIGA-UNAM.



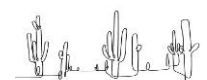
- Puc-Alcocer, M., Arce-Ibarra, A. M., Cortina-Villar, S. y Estrada-Lugo, E. I. J. (2019). Rainforest conservation in Mexico's lowland Maya area: Integrating local meanings of conservation and land-use dynamics. *Forest Ecology and Management*, 448:300–311. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.016>
- Quiroz, O. Y. (2009). *Modelo dinámico de cambio de cobertura y uso suelo en una zona de transición urbano-rural, entre la ciudad de Morelia y el ejido Jesús del Monte*. Tesis de Maestría en Geografía. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán, México.
- Reyes-Palomeque, G., Dupuy, J. M., Portillo-Quintero, C. A., Andrade, J. L., Tun-Dzul, F. J., y Hernández-Stefanoni, J. L. (2021). Mapping forest age and characterizing vegetation structure and species composition in tropical dry forests. *Ecological Indicators*, 120:106955. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106955>
- Ridel, T. K., Coomes, O., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, X. y Lambin, E. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.001>
- Rodriguez-Galiano, V. y Chica-Olmo, M. (2012). Análisis post-clasificación de los cambios producidos en las cubiertas del suelo de la Provincia de Granada entre 1998 y 2004. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, AGE-CSIC. Madrid, España.
- Rodriguez-Galiano, V. F. y Chica-Rivas, M. (2014). Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and Digital Terrain Models. *International Journal of Digital Earth*, 7:492–509. <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.748848>
- Rodrigues, H. y Soares-Filho, B. (2018). A short presentation of Dinamica EGO. En M. T. Camacho-Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas y F. Escobar (Eds.), *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 493–498). Cham, Switzerland: Springer.
- Rotenberg, E. y Yakir, D. (2010). Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System. *Science*, 327:451–454.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. edición digital. México, D. F.: CONABIO.



- Sánchez, P. L. (2007). *Diagnóstico y consecuencias ecológicas de la extracción y consumo de leña en Colonia San Martín, Valle de Zapotitlán, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Estado de México, México.
- Schimel, D. S. (2010). Drylands in the Earth System. *Science*, 327:418–419.
- Schoorl, J.M., Veldkamp, A. (2001). Linking land use and landscape process modelling: a case study for the Álora region (south Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85: 281–292. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00194-3)
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) y CONANP (Comisión de Áreas Naturales Protegidas). (2013). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán*. México, D. F.: SEMARNAT, CONANP.
- Serra, P., Pons, X. y Saori, D. (2008). Land-cover and land use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28(3):189–209. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001>
- Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O. y Costa, W. L. (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. Guidebook. Belo Horizonte / MG, Brazil: Universidad Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Instituto de Geociencias, Centro de Sensoriamento Remoto.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Follador, M. (2013). A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software*, 43, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.010>
- SRTM. (2018). *SRTM 90 m Digital Elevation Database*. Recuperado el 30 de abril, 2020 de: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Téllez, V. O. (2019). *Base de Datos de la Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, México*. Laboratorio de Recursos Naturales-UBIPRO. FES Iztacala UNAM. México.
- Teme, RDC. (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Turner II, B. L., Lambin, E. F., y Reenberg, A. (2008). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105(7):2751–2671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Turner II, B. L. y Robins, P. (2008). Land-Change Science and Political Ecology: Similarities, Differences, and Implications for Sustainability Science. *Annual Reviews of Environment and Resources*, 33:295–316. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.33.022207.104943>



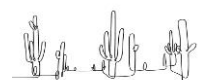
- Valiente-Banuet, A., Flores-Hernández, N., Verdú, M. y Dávila, P. (1998). The chaparral vegetation in Mexico under nonmediterranean climate: the convergence and Madrean-Tethyan hypotheses reconsidered. *American Journal of Botany*, 85(10):1398–1408. <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2307/2446398>
- Valiente-Banuet, A., Casas, A., Alcántara, A., Dávila, P., Flores-Hernández, N., Arizmendi, M. C., Villaseñor, J. L. y Ortega, R. J. (2000). La vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 67:24–74. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1625>
- Valiente-Banuet, A., Solis, L., Dávila, P., Arizmendi, M. C., Silva, P. C., Ortega-Ramírez, J., Treviño, C. J., Rangel-Landa, S. y Casas, A. (2009). *Guía de la vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. México, D. F.: UNAM, CONABIO, INAH, UAT, Fundación para la Reserva de la Biósfera Tehuacán–Cuicatlán.
- Valiente-Banuet, A., Verdú, M., Valladares, F. y García-Fayos, P. (2010). Functional and evolutionary correlations of steep leaf angles in the mexical shrubland. *Oecologia*, 163:25–33. doi:10.1007/s00442-009-1520-9
- Vallejo, M., Casas, A., Pérez-Negrón, E., Moreno-Calles, A. I., Hernández-Ordoñez, O., Téllez, O. y Dávila, P. (2015). Agroforestry systems of the lowland alluvial valleys of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve: an evaluation of their biocultural capacity. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11:1–18. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-11-8>
- Vallejo, M., Ramírez, M. I., Reyes-González, A., López-Sánchez, J. G. y Casas, A. (2019). Sistemas Agroforestales del Valle Tehuacán-Cuicatlán: Uso de la tierra para la conservación de la diversidad biocultural. *Land*, 8, 24. doi:10.3390/land8020024
- Van-Asselen, S., Verburg, P. H. (2013). Land cover change or land-use intensification: Simulating land system change with a global-scale land change model. *Global Change Biology*, 19:3648-3667. <https://doi.org/10.1111/gcb.12331>
- Velasco-Molina, A. (1991). *Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo*. México, D. F.: Limusa.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga, R. S., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62:21–37. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>



- Velázquez, A., Durán, E., Ramírez, I., Mas, J. F., Bocco, G., Ramírez, G., Palacio, J. L. (2003). Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Environmental Change*, 13:175–784. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00035-9)
- Veldkamp, A. y Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1-3):1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Verburg, P. H., Overmars, K. P., Huigen, M. G. A., de Groot, W. Y., Veldkamp, A. (2006a). Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography*, 26:153–173. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.11.005>
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius Jr, R.G., Veldkamp, A. (2006b). Modeling Land-Use and Land-Cover Change. En E. F. Lambin y H. J. Geist (Eds.), *Land-Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts* (pp. 117–135). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Verdú, M., Barrón-Sevilla, J. A., Valiente-Banuet, A., Flores-Hernández, N. y García-Fayos, P. (2002). Mexical plant phenology: is it similar to Mediterranean communities? *Botanical Journal of the Linnean Society*, 138:297–303. <https://doi.org/10.1046/j.1095-8339.2002.00032.x>
- Von Thaden, J. J., Laborde, J., Guevara, S. y Mokondoko-Delgadillo, P. (2020). Dinámica de los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal en la Reserva de la Biósfera Los Tuxtlas (2006-2016). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913190. <http://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3190>
- Wassenaar, T., Gerber, P., Verburg, P. H., Rosales, M., Ibrahim, M. y Steinfeld, H. (2007). Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17:86–104. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007
- Wyman, M. S. y Stein, T. V. (2010). Modeling social and LULCC data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography*, 30:329–342. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.10.001>
- Xie, G., Niculecu, S., Lam, Ch., SEveno, E. (2019). Machine learning methods and classification of vegetation in Brest France. *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments*, IV:111570J. <https://doi/10.1117/12.2533436>
- Xu, T. y Hutchinson, M. (2013). ANUCLIM v. 6.1. Institute of Advanced Studies. Fenner School of Environment and Society. Australia National University.



Zaffar, A., Safriel, U., Niemeijer, D., y White, R. (2005). *Ecosistemas y Bienestar Humano. Síntesis sobre desertificación. Informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio*. Washington, D. C., USA: World Resources Institute.



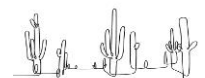
Anexo 1. Tasas de cambio total y anual registradas para el municipio con base en la cartografía digital de INEGI de uso de suelo y vegetación, en escala 1:250 000, series I a VI (INEGI, 1992, 2001, 2003, 2010b, 2013b, 2017).

1985-1993 (I-II)			1985-1993 (I-II) anual			1993-2002 (II-III)			1993-2002 (II-III) anual		
From*	To*	Rate	From*	To*	Rate	From*	To*	Rate	From*	To*	Rate
13	6	0.804623529	13	6	0.27335648	1	8	5.22E-05	1	8	5.71E-06
9	5	0.409115426	9	5	0.07018734	2	8	0.0002045	2	8	2.27E-05
2	8	0.278487311	2	8	0.0380802	3	1	2.56E-05	3	1	3.09E-06
9	1	0.170037756	9	1	0.02917147	3	4	2.56E-05	3	4	3.09E-06
3	5	0.166126513	13	2	0.02354848	3	5	0.17306509	3	5	0.02089237
2	6	0.157240007	13	5	0.02321208	3	7	2.56E-05	3	7	3.09E-06
12	8	0.140921962	3	5	0.02163471	4	6	4.49E-05	4	6	4.99E-06
4	7	0.135127821	2	6	0.02150091	4	7	2.25E-05	4	7	2.50E-06
8	12	0.134300985	8	12	0.01810117	5	1	3.79E-06	5	1	4.16E-07
7	5	0.08952457	4	7	0.01746134	5	3	1.14E-05	5	3	1.25E-06
7	8	0.082432574	12	8	0.01385018	5	6	2.27E-05	5	6	2.50E-06
11	8	0.077997863	7	5	0.01125368	5	7	3.79E-06	5	7	4.16E-07
1	8	0.076514131	7	8	0.01036218	6	1	0.00304246	6	1	0.000338506
1	5	0.070053453	13	12	0.00985931	6	2	3.32E-06	6	2	3.69E-07
13	2	0.069314849	11	8	0.00983636	6	5	3.32E-06	6	5	3.69E-07
13	5	0.068324637	13	1	0.0097558	6	8	1.66E-05	6	8	1.85E-06
3	8	0.061041293	1	8	0.00825614	7	4	1.93E-05	7	4	2.14E-06
11	12	0.060039451	3	8	0.00794943	7	5	1.93E-05	7	5	2.14E-06
1	12	0.055538655	11	12	0.00757162	7	8	3.85E-05	7	8	4.28E-06
6	12	0.052562934	1	5	0.00755901	8	1	0.00367787	8	1	0.000354483
4	3	0.047714214	6	12	0.00633589	8	5	1.31E-06	8	5	1.26E-07
5	6	0.047132789	4	3	0.00616568	8	6	5.23E-06	8	6	5.04E-07
5	8	0.044021781	1	12	0.00599281	8	7	5.23E-06	8	7	5.04E-07
11	5	0.041670091	5	6	0.0057118	10	5	0.00022696	10	5	2.52E-05
12	1	0.041490689	5	8	0.0053348	11	8	4.19E-05	11	8	4.66E-06
6	8	0.034533945	11	5	0.00525504	12	1	7.09E-06	12	1	2.23E-06
4	8	0.032371555	8	5	0.00429879	12	5	1.06E-05	12	5	3.34E-06
4	6	0.032225831	4	8	0.00418308	12	7	3.55E-06	12	7	1.11E-06
8	5	0.031894741	4	6	0.00416425	12	8	0.99997872	12	8	0.314323117
6	5	0.031503893	6	8	0.00416269			4.07E-02			1.16E-02
12	5	0.03070407	12	1	0.00407781						
7	4	0.029698923	6	5	0.00379745						
13	12	0.029020833	3	1	0.00377127						
3	1	0.028958474	7	4	0.0037333						
13	1	0.028716152	8	1	0.00362695						
7	12	0.028101798	7	12	0.00353253						
8	1	0.026910055	8	6	0.00349048						
8	6	0.025897523	5	12	0.00308506						
5	12	0.0254574	12	5	0.00301768						
5	7	0.024843331	5	7	0.00301065						
5	1	0.022476525	5	1	0.00272383						
5	3	0.021321589	5	3	0.00258386						
1	4	0.019135776	9	8	0.00249843						
3	4	0.018489589	3	4	0.00240791						
5	10	0.017478579	5	10	0.00211815						
9	8	0.014563107	1	4	0.00206482						
4	12	0.014010326	4	12	0.00181043						
8	7	0.011090624	8	7	0.0014948						
7	1	0.009364097	7	1	0.00117711						
6	4	0.00787237	6	4	0.00094893						
1	3	0.007257399	5	4	0.0007895						
12	7	0.006773133	1	3	0.0007831						
5	4	0.006514817	12	7	0.00066568						
6	1	0.004997244	6	1	0.00060236						
12	11	0.003833509	2	12	0.00048763						
2	12	0.003566097	3	7	0.00038563						
5	11	0.003127275	5	11	0.00037898						
3	7	0.002961132	12	11	0.00037677						
8	11	0.002731199	8	11	0.00036811						
7	6	0.002642862	7	6	0.00033222						
1	7	0.001897643	1	7	0.00020476						
12	6	0.00179977	8	2	0.00017747						
8	2	0.00131673	12	6	0.00017689						
4	5	0.000582896	4	5	7.53E-05						
11	6	0.000452042	11	6	5.70E-05						
8	9	0.000398643	8	9	5.37E-05						
12	4	0.00015598	8	10	1.60E-05						
8	10	0.000118605	12	4	1.53E-05						
1	6	0.000101401	1	6	1.09E-05						
6	11	3.60E-06	6	11	4.34E-07						
		0.057560405			0.01064346						



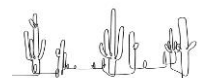
2002-2007 (III-IV)			2002-2007 (III-IV)		
From*	To*	Rate	From*	To*	Rate
1	3	0.000160927	1	3	3.69E-05
1	4	0.000412375	1	4	9.45E-05
1	5	0.332917605	1	5	0.076253925
1	6	0.000352028	1	6	8.06E-05
1	7	0.00053307	1	7	0.000122098
1	8	0.00613534	1	8	0.001405284
1	9	9.05E-05	1	9	2.07E-05
2	6	0.002658759	2	6	0.000531556
2	8	0.005931077	2	8	0.001185779
3	1	0.000588837	3	1	0.000117754
3	4	0.000991725	3	4	0.000198323
3	5	0.002665262	3	5	0.000532993
3	7	0.000495863	3	7	9.92E-05
4	1	0.001235955	4	1	0.000247235
4	3	2.25E-05	4	3	4.50E-06
4	6	0.001078652	4	6	0.000215769
4	7	0.001977528	4	7	0.000395577
4	8	0.004067416	4	8	0.000813629
5	1	0.013208614	5	1	0.002519925
5	3	0.000510014	5	3	9.73E-05
5	6	0.000532188	5	6	0.00010153
5	7	0.000994157	5	7	0.000189664
5	8	0.002871599	5	8	0.00054784
5	10	0.00012196	5	10	2.33E-05
5	11	8.50E-05	5	11	1.62E-05
6	1	0.000386037	6	1	7.72E-05
6	2	4.33E-05	6	2	8.66E-06
6	4	0.000356086	6	4	7.13E-05
6	5	0.000545777	6	5	0.000109207
6	8	0.003870358	6	8	0.000774435
6	11	2.33E-05	6	11	4.66E-06
7	1	0.000192597	7	1	3.91E-05
7	3	9.63E-06	7	3	1.96E-06
7	4	0.00166596	7	4	0.000338337
7	5	0.037277069	7	5	0.007570543
7	8	0.004217865	7	8	0.0008566
8	1	0.000532856	8	1	0.000106558
8	2	7.67E-05	8	2	1.53E-05
8	3	5.75E-06	8	3	1.15E-06
8	5	0.001113632	8	5	0.000222699
8	6	0.000924832	8	6	0.000184944
8	7	0.000152382	8	7	3.05E-05
8	9	1.92E-06	8	9	3.83E-07
8	10	8.63E-06	8	10	1.72E-06
8	11	0.000122672	8	11	2.45E-05
9	1	0.001184834	9	1	0.000237502
9	5	0.003554502	9	5	0.000712506
9	8	0.004146919	9	8	0.000831257
10	5	0.003859251	10	5	0.000770313
10	8	0.000681044	10	8	0.000135938
11	5	0.001342	11	5	0.000268481
11	8	0.006039002	11	8	0.001208165
		8.71E-03			1.93E-03

2007-2011 (IV-V)			2007-2011 (IV-V) anual		
From*	To*	Rate	From*	To*	Rate
1	3	0.000357633	1	3	8.94E-05
1	4	0.000572213	1	4	0.00014301
1	5	0.002417601	1	5	0.00060422
1	6	0.001001373	1	6	0.00025027
1	7	0.00021458	1	7	5.36E-05
1	8	0.005636301	1	8	0.00140865
1	9	0.000128748	1	9	3.22E-05
2	6	0.005210462	2	6	0.00130331
2	8	0.017368206	2	8	0.00434438
3	1	0.001363242	3	1	0.000341
3	4	0.00055769	3	4	0.0001395
3	5	0.00759078	3	5	0.00189878
3	7	0.000464742	3	7	0.00011625
3	8	0.000805552	3	8	0.0002015
4	1	0.000944245	4	1	0.00023599
4	3	0.001438849	4	3	0.0003596
4	6	0.002810252	4	6	0.00070234
4	7	0.005328237	4	7	0.00133164
4	8	0.000179856	4	8	4.50E-05
5	1	0.000378206	5	1	9.46E-05
5	3	0.000654461	5	3	0.00016364
5	6	0.000960315	5	6	0.00024011
5	7	0.000855075	5	7	0.0002138
5	8	0.00418	5	8	0.00104514
5	9	0.000190747	5	9	4.77E-05
5	10	0.000190747	5	10	4.77E-05
5	11	0.000200614	5	11	5.02E-05
6	1	0.000246554	6	1	6.16E-05
6	2	0.000199909	6	2	5.00E-05
6	4	0.000259881	6	4	6.50E-05
6	5	0.000673026	6	5	0.00016826
6	8	0.003135235	6	8	0.00078384
7	1	0.000570422	7	1	0.00014246
7	3	0.000110081	7	3	2.75E-05
7	4	0.00154114	7	4	0.00038489
7	5	0.002551888	7	5	0.00063732
7	8	0.002001481	7	8	0.00049986
8	1	0.000399519	8	1	9.99E-05
8	2	0.000140838	8	2	3.52E-05
8	4	0.000213652	8	4	5.34E-05
8	5	0.001254127	8	5	0.00031356
8	6	0.000742512	8	6	0.00018564
8	7	0.00040431	8	7	0.00010109
8	9	1.82E-05	8	9	4.55E-06
8	10	3.83E-06	8	10	9.58E-07
8	11	0.000156167	8	11	3.90E-05
9	1	0.008638665	9	1	0.00214676
9	8	0.000893655	9	8	0.00022208
10	5	0.005195392	10	5	0.00130094
10	8	0.013101423	10	8	0.00328064
11	5	0.000251815	11	5	6.29E-05
11	6	0.000461661	11	6	0.00011538
11	8	0.007974147	11	8	0.001993
		2.13E-03			5.34E-04



2011-2014 (V-VI)			2011-2014 (V-VI) anual		
From*	To*	Rate	From*	To*	Rate
1 (Pi)	5 (AT)	0.013407662	1	5	0.004489344
4 (Ch)	7 (VSCh)	2.25E-05	4	7	7.49E-06
		6.72E-03			2.25E-03

Numero de clase	Nombre de clase
1	Pastizal inducido
2	Agricultura de riego anuañ
3	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
4	Chaparral
5	Agricultura de temporal anual
6	Matorral desértico rosetófilo
7	Vegetación secundaria arbustiva de chaparral
8	Matorral crasicaule
9	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate
10	Asentamientos humnos
11	Bosque de mezquite
12	Vegetación secundaria de matorral crasicaule
13	Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo



Anexo 2. Tipos de suelo (FAO, 2008) utilizados como variable explicativa para analizar las transiciones entre clases de CUT

Clave	Asociaciones de Tipos de Suelo	Grupos de Suelo de Referencia	Calificadores	Clase Textural
1	LPcali+LPrz/2	LP = Leptosol	ca = calcárico	1 = Fina
2	LPcali+LPrz+PHcalep/2	RG = Regosol	eu = éutrico	2 = Media
3	LPcali+LPrz+RGcalep/2	PH = Feozem	ha = háptico	R = Rocoso
4	LPcali+PHcalep/2	VR = Vertisol	lep = léptico	
5	LPcali+RGcalep+LPmo/2	GY = Gypsisol	li = lítico	
6	LPcamo+RGeulep/2		mo = mólico	
7	LPcamo+VRmzpe+PHha/2		mz = mázico	
8	LPeu+RGeulep/2		pc = petrocálcico	
9	LPeuli+PHlep+RGeulep/2		pe = pélico	
10	LPeuli+RGeulep/2		rz = réndzico	
11	LPeuli+RGeulep+PHha/2			
12	LPmo+LPcali/2			
13	LPrz+PHcalep+LPcali/2			
14	LPrz+PHcalep+VRmzpe/2			
15	LPrz+VRpepc+RGcalep/2			
16	PHcalep+LPeuli/2			
17	PHcalep+RGcalep+LPcali/2			
18	RGcalep+LPcali+PHha/1R			
19	RGeulep+GYha+LPeuli/1			
20	RGeulep+LPeuli/1			



Anexo 3. Manuscrito aceptado en la Revista Mexicana de Biodiversidad

1 Hernández-Moreno et al. Cobertura vegetal y uso del terreno de Zapotitlán, Puebla

2 **Distribución de la cobertura vegetal y del uso del terreno del municipio de Zapotitlán,**
3 **Puebla, México**

4 **Vegetation cover and land use distribution in Zapotitlán municipality, Puebla, México**

5

6 Mayra Mónica Hernández-Moreno^{a*}, Oswaldo Téllez-Valdés^a, Enrique Martínez-Meyer^b,

7 Luis Alfredo Islas-Saldaña^c, Víctor Manuel Salazar-Rojas^a, Humberto Macías-Cuéllar^a

8

9 ^a Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala

10 Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida de los Barrios Número 1, Colonia Los
11 Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, CP 54090.

12 hernandez.moreno@iztacala.unam.mx*, tellez@unam.mx, adnbic@gmail.com,

13 maciascuellar@unam.mx

14 ^b Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N,

15 CU, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX. emm@ib.unam.mx

16 ^c Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional

17 Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Sin Nombre, 58190 Morelia,

18 Michoacán. lisl@cieco.unam.mx

19 *Autor para correspondencia: hernandez.moreno@iztacala.unam.mx

20

Resumen

22 La identificación de la distribución espacial de la Cobertura Vegetal y el Uso del

23 Terreno (CVUT) es relevante para la evaluación y planificación del manejo sustentable de

24 cualquier territorio. El objetivo de este trabajo es mostrar la distribución actual de CVUT, en
25 el municipio de Zapotitlán, Puebla, con un mapa en escala 1:50,000. Se realizó una
26 clasificación de una imagen satélite Landsat-8 OLI, utilizando el método de bosques
27 aleatorios, datos de verificación de campo y datos auxiliares (variables topográficas y
28 climáticas). Se obtuvo un valor de exactitud total de la clasificación del 68% y un coeficiente
29 de Kappa de 0.63. El 79.7% de la zona presenta cobertura vegetal natural, siendo la Tetechera
30 de *Cephalocereus tetetzo* la clase dominante (21.2%). En el 8.9% del territorio se realizan
31 actividades agrícolas y el 10.1% están desprovistas de cobertura vegetal. La zona de estudio
32 presenta un nivel bajo de transformación territorial, sin embargo, elaborar la cartografía de la
33 distribución de la CVUT, en la escala geográfica señalada, permitirá analizar los procesos de
34 modificación o conversión, valorar el impacto de las acciones de conservación y orientar
35 acciones de manejo sustentable de las coberturas vegetales reconocidas en el área.

36 **Palabras Clave.** Valle de Tehuacán-Cuicatlán, asociaciones vegetales, clasificación de
37 imágenes por aprendizaje automatizado, bosques aleatorios, LANDSAT-8

38 **Abstract**

39 The identification of Land Use and Vegetation Cover (LUVC) distribution relevant
40 for sustainable land management and planification of any territory. The aim of this study is to
41 present the current spatial distribution of LUVC of the municipality of Zapotitlán, Puebla,
42 with a map on a scale of 1:50,000. We classified a Landsat-8 OLI satellite image using the
43 random forest method, field verification data, and complemented the analysis with
44 topographic and climatic variables. We obtained an overall accuracy of 68% and a Kappa
45 coefficient of 0.63. We found that 79.7% of the area still holds natural vegetation cover, being
46 the tetecho (*Cephalocereus tetetzo*) forest (“tetechera”) the dominant class (21.2%). In 8.9%
47 of the territory, people carry out agricultural activities and 10.1% correspond to bare soil.
48 Much of the area still holds natural vegetation, however, the cartography of LUVC

49 distribution in that geographical scale, will allow to analyze the modification or conversion
50 processes, assess the impact of conservation actions, and guide actions for the sustainable
51 management of natural vegetation cover.

52 **Keywords.** Tehuacán-Cuicatlán Valley, plant associations, image classification by learning
53 machine, random forest, LANDSAT-8

54 **Introducción**

55 Las zonas áridas y semiáridas revisten gran importancia debido a la extensión que
56 ocupan en el planeta (Rotenberg y Yakir, 2010; Schimmel, 2010; Zaffar et al., 2005), ya que
57 proveen una importante cantidad de bienes y servicios ecosistémicos, entre ellos la
58 producción de alimentos, fibras, forraje, leña y productos bioquímicos, la regulación del clima
59 a nivel local, la captación de carbono y por su diversidad e identidad cultural (Zaffar et al.,
60 2005). Sin embargo, la problemática que representa el estrés hídrico al que se ven sometidas,
61 reflejan que son sistemas muy vulnerables a la degradación, por el impacto de las actividades
62 humanas (Orr et al., 2017). En México, las zonas áridas no son la excepción a ese problema,
63 pero además, son importantes debido a la riqueza y diversidad de especies vegetales y a los
64 altos niveles de endemismo que presentan (Dávila et al., 2002; González-Medrano, 2012;
65 Montaña y Monroy, 2000; Muñoz et al., 2008; Rzedowski, 2006; Velasco-Molina, 1991),
66 además de que albergan más de 25 grupos indígenas, con un vasto conocimiento tradicional
67 sobre sus recursos (Casas et al., 2014; González-Medrano, 2012; Montaña et al., 2006).
68 Tomando en cuenta lo anterior, es de suma importancia conocer a detalle la estructura y
69 composición de estos sistemas y entender los procesos de transformación a los que están
70 sujetos.

71 Dos de los elementos estructurales del paisaje son la cobertura y el uso del
72 terreno. El primero de éstos incluye a los atributos de la superficie terrestre y del subsuelo de
73 origen natural, pero también las construcciones hechas por el ser humano, como carreteras,

74 ciudades, presas, etc. (EIONET, 2020; Jansen y Di Gregorio, 2002; Lambin y Geist, 2006).
75 Con respecto al uso del terreno, se refiere a cómo los seres humanos aprovechan la CT para
76 producir bienes y servicios (Chilar y Jansen, 2001; Lambin y Geist, 2006).

77 Así, la cobertura vegetal (CV), entendida como la capa de vegetación natural que
78 cubre la superficie terrestre, producto de la evolución ecológica y que está limitada por
79 factores biofísicos, como el clima, la topografía, el tipo de suelo y la disponibilidad de agua
80 (López et al., 2010), forma parte de la cobertura del terreno y es materia fundamental para
81 describir el uso del terreno. Por ello, es de suma importancia contar con información sobre la
82 distribución espacial de la CV y su uso, en el contexto de la planificación territorial y del
83 manejo y aprovechamiento de los recursos naturales de cualquier región, incluyendo su
84 conservación, recuperación y ordenamiento (Jardel et al., 2013).

85 Existen diversos métodos para estudiar, conocer y representar la distribución
86 espacial de la CV. Uno de ellos es la realización de cartografía, mediante la clasificación de
87 imágenes de satélite, la cual consiste en “asignar a cada píxel de una imagen una clase o
88 categoría particular, basada en propiedades estadísticas de sus valores de reflectancia en
89 diferentes bandas del espectro electromagnético” (Kamusoko, 2019, p. 81). Uno de los
90 métodos para la clasificación de imágenes es el aprendizaje automático (Holloway y
91 Mengersen, 2018; Pereira e Silva et al., 2020; Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014;
92 Sharma et al., 2017), el cual se basa en métodos computacionales heurísticos sobre la relación
93 entre la variable de respuesta y sus variables predictoras, centrándose en el rendimiento, más
94 que en los mecanismos estadísticos subyacentes y supuestos del modelo, a diferencia de los
95 enfoque estadísticos convencionales (Kamusoko, 2019).

96 Por otro lado, el municipio de Zapotitlán ha sido motivo de interés para realizar
97 numerosos estudios científicos (Arias-Toledo et al., 2000; Muñoz et al., 2007, 2008; Osorio et
98 al., 1996; Paredes-Flores et al., 2007; Zavala, 1980) y en el que diversas instituciones

99 gubernamentales han intervenido a lo largo de varias décadas (SEMARNAT y CONANP,
100 2013), debido a sus características biofísicas y socioeconómicas y por ubicarse dentro de la
101 Reserva de la Biósfera de Tehuacán Cuicatlán, declarada en 2018 “Patrimonio mixto de la
102 Humanidad por la UNESCO”, por su valor natural y cultural (Hábitat Originario de
103 Mesoamérica) (Guevara, 2018). Dentro de los numerosos estudios que se han realizado en la
104 región, destacan los trabajos realizados bajo el enfoque de caracterización y clasificación de la
105 vegetación, como los trabajos de Miranda y Hernández-X. (1963), quienes describen los tipos
106 de vegetación de México. Por su parte, Osorio et al. (1996) analizan la diversidad β en la
107 zona, y describen los principales tipos de vegetación, en un gradiente altitudinal, que va de los
108 1350 a los 1700 m, en el Cerro Cutá y sus alrededores. Asimismo, Valiente-Banuet et al.
109 (2000, 2009) describen los tipos de vegetación y asociaciones vegetales para el Valle de
110 Tehuacán-Cuicatlán, principalmente con base en su fisonomía y recientemente, el mapa de
111 vegetación que proponen Pérez-Valladares et al. (2019), basados en información cartográfica
112 digital disponible y conocimiento experto. Toda esta información presenta las características
113 de las formaciones vegetales de algunos sitios de Zapotitlán, pero con alcances distintos. Por
114 ello, son la base que brinda un entendimiento de la vegetación del Valle de Tehuacán-
115 Cuicatlán, pues ofrece datos sobre la composición florística y la estructura en distintas áreas,
116 así como interpretaciones fisonómicas, que se han ido acumulando a través del tiempo, y que
117 han permitido tener mejores aproximaciones a un conocimiento más detallado de la
118 vegetación y las asociaciones vegetales que existen en Zapotitlán.

119 Sin embargo, debido a la complejidad ambiental y heterogeneidad del terreno del
120 Valle de Tehuacán-Cuicatlán, asociada a su historia geológica, variación topográfica
121 (González-Medrano, 2003; Rzedowski, 2006; Muñoz et al., 2007), e historia milenaria de uso
122 y manejo de los recursos naturales (Casas et al., 2014), aún no se cuenta con un mapa de la
123 distribución actual de la cobertura del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla, en una

124 escala geográfica que permita diferenciar la cobertura vegetal y el uso del terreno, así como
125 orientar la toma de decisiones en el contexto del manejo y conservación de los recursos
126 naturales. En consecuencia, el objetivo del presente trabajo es mostrar la distribución espacial
127 de la cobertura vegetal y el uso del terreno (CVUT), del año 2018, para este municipio,
128 generando un mapa en escala 1:50,000.

129 **Materiales y métodos**

130 *Área de estudio.* El municipio de Zapotitlán se localiza en la parte sureste del estado de
131 Puebla, al centro-sur de México, entre los 18°07'18" y 18°26'00" N y los 97°19'24" y 97°39'06" O
132 (Figura 1); tiene una superficie de 431.49 km², con una temperatura media anual entre 17.6 y 23.7 °C y
133 una oscilación térmica que varía entre 7 y 14 °C (García, 2004). La precipitación media anual registrada
134 en el área es de 412.4 mm (Muñoz et al., 2007) y pertenece a dos regiones geomorfológicas: el noreste
135 forma parte del Valle de Tehuacán y el resto está conformado por la sierra de Zapotitlán (Muñoz et al.,
136 2007).

137 Fisiográficamente, la zona es compleja y variable, como consecuencia del origen y antigüedad
138 del área (Muñoz et al., 2008; Valiente-Banuet et al., 2000). El relieve se refleja en la variación altitudinal,
139 que va de los 1380 a los 2580 m, en las fluctuaciones de las pendientes, así como en sus formas de
140 relieve (Muñoz et al., 2008; Valiente-Banuet et al., 2000). La litología superficial está dominada por
141 asociaciones de rocas sedimentarias, como calizas, lutitas, conglomerados y areniscas (Muñoz et al.,
142 2007; Valiente-Banuet et al., 2000), con cuatro grupos de suelo, Leptosoles, Regosoles, Fluvisoles y
143 Calcisoles (Muñoz et al., 2007). En su mayor parte, el municipio pertenece a la Región Hidrológica
144 RH28 de la cuenca del Papaloapan; sólo el extremo SO pertenece a la cuenca del Balsas (Muñoz et al.,
145 2007).

146 La vegetación se considera un relictos del matorral xerófilo que alguna vez imperó en todo el
147 Valle de Tehuacán, destacando que 13.9% del total de las especies son endémicas (Dávila et al., 2002).
148 Debido a la heterogeneidad ambiental de la zona, la agrupación de las diferentes especies permite que
149 haya variantes en las asociaciones vegetales, entre las que dominan los bosques de cactáceas columnares,
150 como la Tetechera de *Cephalocereus tetetzo* y el Cardonal de *C. columna-trajani*; el Mezquital de

151 *Prosopis laevigata*, el Mexical y la Selva Baja Caducifolia (Valiente-Banuet et al., 2000, 2009). De
152 acuerdo con Arias-Toledo et al. (2000), Paredes-Flores et al. (2007) y Sánchez (2007), los usos del
153 terreno registrados se pueden clasificar en: 1) agrícola de temporal anual y de riego, 2) sistemas
154 agroforestales, agroganaderos y agroindustriales (granjas avícolas), 3) uso ganadero de caprinos,
155 equinos y bovinos, 4) uso forestal no maderable, 5) uso minero, con explotación de yacimientos de ónix,
156 de recursos pétreos, de áreas dedicadas a la producción de sal artesanal en las salinas (Vallejo et al.,
157 2015), y del suelo arcilloso de Los Reyes Metzontla, para la elaboración de artesanías de barro con
158 técnicas prehispánicas (Arias-Toledo et al., 2000), y 6) uso urbano, con la presencia de vivienda con
159 sistemas de traspatio, para autosubsistencia e infraestructura urbana.

160 *Métodos.* Para cubrir los objetivos del trabajo se diseñó una ruta de cuatro pasos,
161 que incluye el manejo de la base de datos, la generación de la leyenda, la clasificación de la
162 imagen de satélite y el trabajo de campo. Para el primero de estos pasos, se trabajó con una
163 base de datos de 15,221 registros florísticos (Téllez, 2019), que fue depurada, con la finalidad
164 de eliminar registros duplicados, mal georreferenciados, o que carecieran de la información
165 sobre el tipo de asociación vegetal, obteniéndose 322 sitios distribuidos en la zona de estudio,
166 a la que se le adicionaron 198 puntos de verificación en campo. Esta información fue
167 reclasificada en el programa ArcMap 10.5, para generar las capas vectoriales de los sitios
168 registrados en cada uno de los tipos de CVUT y crear los campos de entrenamiento para la
169 clasificación. Adicionalmente, se compiló una base de datos de 85,000 registros
170 (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) (CONABIO, 2020), que incluye los 15,221 de
171 Téllez (2019), con la que se elaboró un listado de especies por tipo de CVUT identificados
172 para Zapotitlán, mediante el cruce de las bases de datos (Apéndice 1).

173 Para la generación de la leyenda, se construyó una propuesta conformada por 17
174 clases de CVUT (Tabla 1). El sistema de clasificación empleado para nombrar las clases de
175 CV es el propuesto por Valiente-Banuet et al. (2009), el cual define las asociaciones vegetales
176 para el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, con base en criterios estructurales, fisonómicos y de la

177 composición de especies; entendiendo como asociación vegetal a las variaciones en la
178 composición y estructura dentro de un tipo de vegetación, de acuerdo con la diversidad en las
179 características del suelo, el clima, la pendiente, la orientación, la altitud, las interacciones
180 bióticas entre las especies y su diversificación (Heywood, 1954). Para los usos del terreno se
181 utilizó la clasificación propuesta por el INEGI (2017a). Sin embargo, la heterogeneidad
182 ambiental del sitio de trabajo y la dificultad de acceso y muestreo en algunos sitios, no han
183 permitido disponer de información suficiente, por lo que las clases Tetechera de *C. tetezo* y la
184 de *C. mezcalaensis* y *C. macrocephala*, se integraron como una sola clase denominada
185 Tetechera de *Cephalocereus tetezo* (Tet_Ct).

186 La clasificación se realizó mediante técnicas no paramétricas de aprendizaje
187 automático (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014), utilizando como insumo una imagen de
188 satélite Landsat 8-OLI (30 metros de resolución espacial) de febrero de 2018, obtenida de la
189 plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Asimismo, se utilizaron los
190 paquetes ‘caret’ (Kuhn, 2008), ‘nnet’ (Ripley, 2020), ‘e1071’ (Meyer et al., 2019), ‘raster’
191 (Hijmans et al., 2019) y ‘random forest’ (Breinman y Cutler, 2018) del programa de código
192 abierto R versión 4.0 (Teme RDC, 2020). El proceso de clasificación se desarrolló en cuatro
193 etapas: 1) la preparación y visualización de datos, 2) la evaluación y selección del modelo
194 óptimo, que produjeron una primera clasificación de la CVUT, 3) la post-clasificación y, 4) la
195 evaluación del mapa final. En la primera, se generó una imagen multibanda (bandas 1 a 7), en
196 la cual se crearon los campos de entrenamiento usando diversos compuestos RGB (Franco,
197 2017). Los campos de entrenamiento se dividieron en subconjuntos de entrenamiento y
198 validación, en una proporción 80:20; es decir, el 80% de las áreas de entrenamiento se
199 utilizaron para revisar el desempeño inicial del modelo y el 20% para la evaluación final de la
200 exactitud (Kamusoko, 2019). Utilizando el conjunto de entrenamiento, se graficaron los
201 perfiles espectrales de cada clase de CVUT, la distribución de la densidad de las clases en

202 cada una de las bandas, la dispersión entre las clases y las bandas para diferenciar la
203 separabilidad entre las clases de CVUT, así como las bandas a utilizarse en la modelación.

204 Una vez seleccionadas las clases finales y los insumos espectrales, se configuraron los
205 parámetros de ajuste de los modelos de aprendizaje, método de remuestreo, número de
206 iteraciones y de repeticiones que indica el número de pliegues o subconjuntos para realizar la
207 validación cruzada (Kamusoko, 2019). Para evitar problemas de sobreajuste, se seleccionaron
208 los modelos óptimos, tomando en cuenta los valores de exactitud total y el coeficiente de
209 Kappa (Congalton y Green, 2019) y se estimó su rendimiento. El método de validación
210 cruzada utilizado, es un procedimiento mediante el cual los datos de entrenamiento se
211 subdividen en varios grupos mutuamente excluyentes y del mismo tamaño, para producir el
212 modelo y después validarlo (Kamusoko, 2019); para ello, se seleccionaron cinco iteraciones
213 de remuestreo y cinco subconjuntos (pliegues). Se evaluaron cinco diferentes modelos de
214 aprendizaje automático: Bosques Aleatorios (RF, por sus siglas en inglés), máquina de
215 soporte de vectores (SVM), funciones de particionamiento y regresión (R-part), vecino más
216 cercano (KNN) y redes neurales artificiales (ANN), utilizando, como datos auxiliares (Ghosh
217 et al., 2014), las 7 bandas de la imagen LANDSAT, las variables topográficas altitud y
218 orientación, extraídas a partir del modelo digital de elevación (SRTM, 2018, resolución de 30
219 m) y las variables climáticas de precipitación anual y temperatura máxima anual (Cuervo-
220 Robayo et al., 2014), reinterpoladas a 30 m de resolución con el programa ANUCLIM 6.1
221 (Xu y Hutchinson, 2013), que utiliza un modelo digital de elevación de esa resolución y los
222 archivos de superficie generados en la interpolación hecha originalmente a 1 km, con el
223 programa ANUSPLIN 4.4 (Xu y Hutchinson, 2013). Para esta primera clasificación, el
224 modelo resultante de las dos primeras etapas de trabajo, fue seleccionado mediante el criterio
225 que emplean Pereira e Silva et al. (2020) para los valores de exactitud total y coeficiente de
226 Kappa: pobre: <0, leve: 0-0.2, justo: 0.21-0.4, moderado: 0.41-0.6, substancial: 0.61-0.8, casi

227 perfecto: 0.81-1.0.

228 En la post-clasificación, en primer lugar, se separaron las coberturas agregadas en la
229 etapa de preparación y visualización. Para esto se utilizó el registro geográfico de las especies
230 más representativas de cada clase y se modeló su distribución potencial (MDP), generando
231 diferentes modelos candidatos, mediante el algoritmo de Máxima Entropía (Phillips et al.,
232 2006) y seleccionando el de mejor desempeño con los criterios ROC parcial y tasas de
233 omisión, con el paquete 'kuenm' (Cobos et al., 2019). Para realizar los MDP se utilizaron las
234 variables bioclimáticas elaboradas por Cuervo-Robayo et al. (2014), interpoladas a 30 m,
235 empleando el mismo método de la etapa anterior. Teniendo los MDP, se asignó la categoría
236 correspondiente a cada pixel de las clases agregadas, comparando los mapas de las diferentes
237 especies, y asignándoles el tipo de cobertura vegetal en función del valor máximo de
238 probabilidad. El segundo paso de esta etapa consistió en revisar y mejorar las coberturas de
239 las zonas agrícolas y los asentamientos humanos, comparándolas con las imágenes de alta
240 resolución de la plataforma Google Earth Pro y la base de datos Open Street Map,
241 (www.openstreetmap.org), ambos de 2020. El mapa fue generalizado, aplicando un filtro
242 espacial con un umbral de 6 pixeles (todos los parches con menos de 6 pixeles, se
243 generalizan) y con una conexión de pixel de 4, en una ventana de 3x3 (Aldalur y Santamaría,
244 2002), para obtener el mapa final de la cobertura vegetal y uso del terreno de Zapotitlán,
245 Puebla, cuya escala fue determinada de acuerdo con Priego-Santander et al. (2010).

246 La última etapa consistió en la evaluación del mapa final, mediante la realización
247 de una matriz de confusión (Congalton y Green, 2019), en la cual se compararon las clases
248 resultantes en la post-clasificación, contra las clases obtenidas a partir de los puntos de
249 verificación. Se definieron 850 puntos de manera aleatoria, buscando alcanzar una
250 representatividad de las 17 clases de CVUT, de acuerdo a lo sugerido por Lillesand et al.
251 (2004). La asignación de la clase correspondiente a cada sitio de verificación se realizó

252 comparando su área de influencia con la de los sitios de entrenamiento, utilizando el
253 algoritmo de región incremental automático, disponible con el complemento de Semi-
254 Automatic-Plugin Classification (Congedo, 2016) en el software QGIS 3.10, el cual permite
255 seleccionar los píxeles similares a un píxel semilla, considerando la similitud espectral, es
256 decir, la distancia espectral de los píxeles adyacentes. De este modo, en donde las áreas de
257 influencia de los sitios de verificación coincidían espacialmente con las áreas de
258 entrenamiento, se asignó la clase de CVUT correspondiente. Un total de 652 puntos fueron
259 discriminados con dicho algoritmo; los 198 restantes se identificaron en campo entre 2017 y
260 2018, a partir de la verificación directa en el terreno, aplicando conocimiento experto, tanto de
261 los autores, como de los pobladores locales. De estos sitios se cuenta con un registro
262 fotográfico y videográfico. La calidad final del mapa de CVUT se evaluó mediante los
263 criterios de exactitud y de coeficiente de Kappa empleados en la segunda etapa, y con los
264 valores de sensibilidad (exactitud del usuario) y especificidad (Congalton y Green, 2019),
265 para evaluar el desempeño individual de cada clase de CVUT.

266 La descripción y caracterización de cada tipo de CVUT se hizo integrando las
267 propuestas por diferentes autores (INEGI, 2017a; Miranda y Hernández-X, 1963; Valiente-
268 Banuet et al., 2009); además, se identificaron elementos conspicuos del paisaje: relieve y tipo
269 de roca en el que se establecen, utilizando los mapas digitales en formato vectorial de
270 topografía, en escala 1:50,000 (INEGI, 2013) y geología, en escala 1:250,000 (INEGI, 2002)
271 (Tabla 1).

272 **Resultados**

273 La base de datos que se utilizó para generar los 160 campos de entrenamiento
274 cuenta con información de la composición florística y distribución de la vegetación y uso del
275 terreno para los 520 sitios. Con esa base de datos y la compilada a partir de otras fuentes de

276 información, se contabilizaron 137 familias y 1211 especies de plantas para todas las clases
277 de CVUT en el municipio (Apéndice 1).

278 A partir del análisis de la información de las bases de datos, se generó la leyenda
279 que consta de tres niveles jerárquicos (Tabla 1). El nivel 1 discrimina sólo dos clases:
280 cobertura vegetal natural y usos del terreno u otros elementos. En el nivel 2 se presenta la
281 equivalencia con los tipos de uso del suelo y vegetación, resaltando que algunos de ellos
282 agregan de tres a cuatro clases del siguiente nivel, como el matorral desértico micrófilo y el
283 matorral crasicaule, por ser una clasificación general, que identifica grandes unidades de
284 vegetación, en función de su afinidad ecológica y fisonómica. En el 3 se presentan las clases
285 de CV a nivel de asociación vegetal y los tipos de uso del terreno resultantes de la
286 clasificación, obteniéndose 17 categorías, de las cuales 13 son de cobertura vegetal natural,
287 dos tipos de uso del terreno (agrícola y urbano), y las otras dos referidas a áreas sin CV (Tabla
288 1).

289 Para el sensor utilizado se uso la banda 6 (1.566-1.651 μm), en la que las clases de
290 CVUT presentaron una respuesta espectral con mayor variabilidad, siendo 11 de las 17 clases,
291 las que presentaron una mayor diferencia entre sí, mientras que las otras seis tuvieron una
292 marcada similitud. Estas últimas se integraron en tres categorías, definidas por la agregación
293 del matorral de *Echinocactus platyacanthus* con el matorral crasi-rosulifolio de *Dasyilirion* y
294 *Agave* (*Echinocactus*- *Dasyilirion*), el izotal de *Yucca periculosa* con el matorral espinoso con
295 espinas laterales (*Yucca*-matorral espinoso) y la tetechera de *Cephalocereus tetetzo* con la
296 selva baja caducifolia (tetechera-selva baja). De este modo, en esta primera clasificación,
297 quedaron definidas 14 categorías para su clasificación mediante los métodos de aprendizaje
298 automatizado, siendo el de bosques aleatorios (RF) el que presentó un mejor desempeño, con
299 un valor de exactitud total de 0.67 y de Kappa de 0.62 (Figura 2). Las variables que más
300 contribuyeron en el rendimiento del modelo, con más del 80% de importancia, fueron la

301 banda 1 (azul profundo), la precipitación anual, la banda 4 (rojo), la orientación de las laderas
302 y la banda 5 (infrarrojo cercano).

303 Los modelos de distribución potencial permitieron discriminar las clases
304 agregadas, en la siguiente proporción de superficie: i) *Echinocactus-Dasyllirion*, en matorral
305 de *Echinocactus platyacanthus* (42.6%) y matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*
306 (57.5%), ii) *Yucca*-matorral espinoso, en izotal de *Yucca periculosa* (76%) y matorral
307 espinoso con espinas laterales (24%) y iii) tetechera-selva baja, en tetechera de *Cephalocereus*
308 *tetetzo* (97.4%) y selva baja caducifolia (2.6%). Por su parte, la revisión y mejoramiento con
309 las imágenes en alta resolución y la plataforma de Open Street Map, incrementó las zonas
310 agrícolas en un 57.2% y los asentamientos humanos en un 27%.

311 El producto principal de la clasificación automatizada y la post-clasificación, es el
312 mapa de la cobertura vegetal y uso del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla (Figura 1),
313 con una escala del modelo de nivel 4 (máximo 1:50,000) y una unidad mínima de mapeo de
314 6.25 ha. El mapa de CVUT muestra que el 79.7% de la zona (34,385.5 ha) presenta cobertura
315 vegetal natural, el 10.1% (4378 ha) carece de ésta y en el 8.9% (3841.3 ha) se desarrollan
316 actividades agrícolas (Tabla 1). Para la cobertura vegetal natural se encontró que la tetechera
317 de *Cephalocereus tetetzo* es la clase dominante, cubriendo 21.2% del área y en ella se
318 presentan 503 especies, seguida del izotal de *Yucca periculosa* (20.5% y 399 especies), el
319 mexical (9.3%, 304) y el izotal de *Beaucarnea gracilis* (7.6%, 252). Las demás clases
320 ocuparon menos del 6% del territorio cada una. Las zonas dedicadas a la producción agrícola
321 registran 457 especies, los asentamientos humanos cubren 1.3% del territorio, con 229
322 especies, y las zonas sin cobertura y sin cobertura con suelo degradado, se distribuyen en
323 5.1% y 5% del área, con 248 y 237 especies, respectivamente (Tabla 1).

324 La evaluación del mapa final mostró una exactitud total de la clasificación de 0.68
325 y un coeficiente de Kappa, de 0.63. Todas las clases obtuvieron valores de especificidad entre

326 0.95 y 0.99 (Tabla 2), mientras que para el caso de la sensibilidad (exactitud del usuario), el
327 cardonal de *Cephalocereus fulviceps*, la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, la selva baja
328 caducifolia, el mezquital de *Prosopis laevigata* y los asentamientos humanos, presentaron
329 valores muy altos: 0.87, 0.84, 0.82, 0.95 y 0.89, respectivamente. El izotal de *Yucca*
330 *periculosa* y las zonas agrícolas, obtuvieron valores intermedios (0.67 y 0.69), mientras que el
331 bosque de *Quercus magnoliifolia*, matorral espinoso con espinas laterales y el matorral de
332 *Echinocactus platyacanthus* registraron valores de 0.38, 0.34, 0.25, respectivamente.
333 Considerando la superficie que cubre cada clase en el terreno, el 58.4% del territorio presenta
334 un valor de exactitud de usuario muy alto (0.67-0.95), el 32.3%, un valor medio (0.42-0.6) y
335 el 9.3%, bajo (0.25-0.38).

336 **Discusión**

337 La descripción de los tipos de vegetación de México ha sido abordada desde el
338 nivel nacional (Gómez-Pompa, 1965; Miranda y Hernández-X, 1963; Rzedowski, 2006),
339 regional (e. g. Mooney y Harrison, 1972), estatal (Miranda, 1952) y local (e. g. Martínez y
340 Galindo-Leal, 2002; Valiente et al., 2000). Sin embargo, la descripción de las asociaciones
341 vegetales que los integran, aún es un tema pendiente en estos mismos niveles (nacional,
342 regional y local), debido a su amplia variedad y al arduo trabajo de campo y gabinete que su
343 estudio representa (Pérez-Valladares et al., 2019; Valiente-Banuet et al., 2009). Por tales
344 motivos, elaborar una cartografía en donde los tipos de vegetación muestren una clara
345 definición de su variación, sus componentes y su estructura, sigue siendo un reto
346 metodológico y de sistematización de la información. No obstante, existen trabajos como el
347 de INEGI (2017a,b) que elabora periódicamente la cartografía de uso de suelo y vegetación a
348 nivel nacional en escala 1:250,000, el de Rzedowski et al. (1964), donde se cartografiaron los
349 principales tipos de vegetación de la mitad septentrional del Valle de México, y el de Pérez-

350 Valladares et al. (2019), quienes elaboran la cartografía de la vegetación del Valle de
351 Tehuacán-Cuicatlán, en escala 1:250,000, a partir de conocimiento experto.

352 Un aspecto particularmente difícil de resolver en la elaboración de la cartografía,
353 ha sido la diferenciación de las asociaciones vegetales dentro de cada tipo de vegetación,
354 utilizando imágenes de satélite (e. g. Martínez y Galindo-Leal 2002, Vega et al., 2008), dado
355 que su patrón de respuesta espectral no refleja detalladamente las variaciones en las
356 características biofísicas del terreno, las interacciones bióticas entre las especies y su
357 diversificación, pues el tamaño del objeto a representar, requiere ser cartografiado por debajo
358 de una escala regional, lo cual no siempre se ajusta con los sistemas y métodos de
359 clasificación convencionales (Pérez-Valladares et al., 2019, Yeo et al., 2020), además de que
360 depende del acceso y disponibilidad (espacial y temporal) a los insumos (ortofotos e imágenes
361 espectrales en alta resolución) necesarios para abordar estos estudios a la escala requerida
362 (Bhatnagar et al., 2020; Yeo et al., 2020). Este es el caso de la vegetación del Valle de
363 Tehuacán-Cuicatlán, y en particular del municipio de Zapotitlán.

364 La flora de Zapotitlán, como todas en el país, es el resultado de procesos
365 biofísicos (climáticos, geológicos y biológicos) (González-Medrano, 2003; Rzedowski, 2006),
366 en interacción con las actividades humanas, que desde hace aproximadamente 12,000 años
367 (McNeish, 1992; Valiente-Banuet et al., 2009) han moldeado un mosaico biocultural (Casas
368 et al., 2014), que a su vez, ha configurado la diversidad de asociaciones vegetales presentes en
369 la región (Miranda y Hernández X., 1963; Valiente et al., 2000, 2009), y que son
370 representadas en este trabajo en un mapa digital con 17 categorías de cobertura vegetal y uso
371 del terreno (CVUT) (Figura 1). En el mapa referido, destaca que únicamente el 8.9% del
372 territorio está dedicado a las actividades agrícolas, en comparación con el 79.7% que presenta
373 cobertura vegetal natural, a pesar de la historia milenaria de actividad agrícola en la región
374 (McAuliffe et al., 2001). Este bajo porcentaje que cubre la superficie agrícola está relacionado

375 con la dominancia de un relieve conspicuo (Muñoz et al., 2007), que restringe la posibilidad
376 de ampliar las fronteras agrícolas. Por otra parte, el 10.1% del territorio no presenta cobertura
377 vegetal, evidenciando procesos de degradación antrópica en la porción sureste, debido al
378 aprovechamiento de los suelos arcillosos para la producción de cerámica (Arias-Toledo et al.,
379 2000) y a las actividades agrícolas; mientras que en las zonas altas, localizadas en la porción
380 norte, se presentan rasgos de degradación natural (Medina-Sánchez et al., 2020), ocasionados
381 por la ocurrencia de procesos erosivos y movimientos en masa (Muñoz et al., 2007).

382 El patrón de distribución de la CV identificado para el municipio a una escala de
383 1:50,000, coincide de manera general con el de Pérez-Valladares et al. (2019), elaborado a
384 una escala 1:250,000, en las clases de vegetación identificadas y en el gradiente altitudinal en
385 el que se localizan. Ambos estudios coinciden en 11 clases, siendo las diferencias la presencia
386 de la selva baja caducifolia en el primero y del bosque de *Juniperus* en el segundo. Respecto
387 al gradiente altitudinal, en ambos estudios se observa que en las partes más altas (1700-2400
388 m s.n.m.), se establece el bosque de *Quercus*, asociado con el matorral desértico rosetófilo de
389 *Dasyllirion* y Agave y el mexical, seguidos por el cardonal de *Cephalocereus fulviceps* y el
390 matorral de *Echinocactus platyacanthus*, entre los 1700 y 1900 m de altitud, el cardonal de
391 *Cephalocereus columna-trajani* y la tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, entre los 700 y 1700
392 m y el Mezquital de *Prosopis laevigata*, a los 1450 m. Este patrón de distribución ocurre en
393 forma de parches, formando un mosaico heterogéneo que, en general, sigue un patrón de
394 cambios altitudinales, geomorfológicos y litológicos que delimitan su distribución (Tabla 1), a
395 pesar de que en muchos sitios se encuentran intercaladas (Figuras 3 y 4). El uso pecuario,
396 principalmente de ganado caprino, se lleva a cabo en todo el municipio, como una actividad
397 que está sujeta a las regulaciones de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán Cuicatlán
398 (SEMARNAT y CONANP, 2013).

399 La aproximación metodológica del presente trabajo permitió corroborar que una

400 de las ventajas de utilizar modelos de aprendizaje de máquina en la clasificación de imágenes
401 satelitales, es la posibilidad de incorporar a las variables biofísicas como información auxiliar
402 que permiten modelar de forma más precisa la distribución de la cobertura del terreno (Ghosh
403 et al., 2014; Kamusoko, 2019), por ser elementos fundamentales para ello (Valiente-Banuet et
404 al., 2009). Lo anterior fue un aspecto crucial, ya que como lo muestran las variables de mayor
405 importancia y el desempeño obtenido por el algoritmo de los bosques aleatorios (Figura 2), la
406 distribución de la cobertura vegetal se encuentra fuertemente influenciada por la precipitación
407 anual y la exposición de laderas. Es de destacarse que tanto la clasificación de INEGI
408 (2017b), como la representación cartográfica de Pérez-Valladares et al (2019) en escala
409 1:250000, no reflejan esta variedad geomorfológica y climática específica para el municipio
410 de Zapotitlán. Además, la variabilidad espectral registrada por las clases de CVUT en el
411 proceso de visualización, está determinada por los niveles de clorofila y la actividad
412 fotosintética (Manzo-Delgado y Meave, 2003), vinculados con la composición de especies de
413 cada clase; y, dado que, dos clases de CV con una composición florística similar, pueden
414 presentar la misma respuesta espectral, el uso de sensores remotos de resolución media tiene
415 que ser compensado mediante un exhaustivo trabajo en campo y un enfoque
416 semiautomatizado (Pérez-Valladares et al., 2019, Adams, 2020; Reyes-Palomeque, 2021),
417 como el desarrollado en la presente contribución. No obstante, el uso de imágenes con una
418 resolución espacial de 30 m es considerado adecuado para representar los objetos del terreno,
419 en una escala de 1:50,000 (Aronoff, 2005). Asimismo, la baja separabilidad entre clases, que
420 derivó en su agregación, responde a la alta reflectividad del suelo desnudo que enmascara la
421 respuesta espectral de la vegetación escasa, dificultando su clasificación (Rodríguez-Galiano
422 y Chica-Rivas, 2014). Por ello, el uso de los modelos de distribución potencial (Peterson et
423 al., 2011; Phillips et al., 2006), elaborados en la post-clasificación y la evaluación de la
424 certidumbre de cada clase, hecha con los puntos de verificación (Tabla 2), representaron un

425 elemento metodológico importante, pues permitieron diferenciar las clases que habían sido
426 agregadas, y valorar la exactitud de su clasificación (Von Thaden et al., 2020).

427 La matriz de confusión (Tabla 2) mostró que aún con la post-clasificación, el
428 mapa final de CVUT presentó una exactitud total del 68%, con un índice de Kappa que es
429 considerado substancial para Pereira e Silva et al. (2020) y moderadamente alto para Ghosh
430 (2014). Este resultado es muy cercano al 69.5% de exactitud total referido por Cheung-Wai y
431 Paleinckx (2008), usando el mismo clasificador para 16 clases; y mayor al 61% reportado por
432 Pérez-Valladares et al. (2019). Sin embargo, dichos resultados son menores al compararlos
433 con los obtenidos por otros autores (Ghosh et al., 2014; Holloway y Mangersen, 2018; Xie et
434 al., 2019), quienes han probado diferentes modelos de clasificación de aprendizaje automático
435 en ecosistemas áridos y semiáridos, obteniendo rendimientos altos, en los cuales la
436 sensibilidad (exactitud de usuario) por clase, osciló entre el 81 y el 100% (Pal, 2005;
437 Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014). En el presente trabajo, la sensibilidad alcanzada en
438 cada una de las clases estuvo entre el 29% y 95% (Tabla 2), variación que está relacionada
439 con el tamaño de la superficie de cada clase (Tabla 1). En este sentido, las clases con
440 extensiones superiores a las 9,000 ha (tetechera de *Cephalocereus tetetzo* e izotal de *Yucca*
441 *periculosa*) presentaron valores de sensibilidad superiores al 67%, mientras que las clases que
442 cubren menos de 4,000 ha (matorral de *Echinocactus platyacanthus*, y mezquital de *Prosopis*
443 *laevigata*), presentaron valores por debajo del 34%. La excepción fue la selva baja
444 caducifolia, que registró una exactitud del 82%, pero sólo se encuentra en 241.7 ha del
445 territorio, esto puede deberse a que, en la primera fase de la clasificación, esta clase se agregó
446 con la de tetechera de *Cephalocereus tetetzo*, que es la segunda de mayor distribución en el
447 territorio (9,129 ha). El hecho de que el 90.7% del municipio presente clases de CVUT con
448 porcentajes medios a altos de píxeles correctamente ubicados en su clase, permite señalar que
449 la mayor parte del territorio fue clasificado con un nivel de certidumbre óptimo.

450 Por otro lado, la alta especificidad registrada en todas las clases (Tabla 2), aunada
451 a la baja sensibilidad de aquellas con menor extensión, indican las dificultades que tuvo el
452 algoritmo de los bosques aleatorios para diferenciar los límites entre ellas. Esto se reafirma
453 por el hecho de que el número de verdaderos positivos por clase, es decir el número de píxeles
454 correctamente clasificados, siempre fue mayor al de los falsos positivos, es decir, los píxeles
455 mal clasificados (Congalton y Green, 2019) (Tabla 2). Lo anterior implica que, si bien el
456 mapa puede tener limitaciones en el 10.1% de la superficie del municipio, debido a la baja
457 sensibilidad en algunas de las clases, su distribución y localización puede ser tomada como
458 punto de referencia, siempre y cuando, la geometría de sus límites sea mejorada para generar
459 información confiable (Von Thaden et al., 2020), empleando técnicas que permitan un trabajo
460 más detallado, como la interpretación visual de imágenes de mayor resolución, obtenidas
461 mediante el uso de vehículos no tripulados (drones) o de satélites comerciales. Sin embargo,
462 su adquisición puede representar una limitación económica (Pérez-Valladares et al., 2019;
463 Von Thaden et al., 2020) y un cierto grado de incertidumbre en cuanto a su disponibilidad
464 temporal, pues no siempre los programas satelitales prevalecen en el tiempo, a diferencia del
465 programa LANDSAT, que ha estado en funcionamiento desde los años 70 (Franco, 2017) y
466 que es de libre acceso.

467 Numerosos estudios se han llevado a cabo en el Valle de Tehuacán Cuicatlán
468 desde diversas áreas del conocimiento (Casas et al., 2014; 2016; Dávila et al., 2002;
469 McAuliffe et al., 2001; MacNeish, 1992; Medina-Sánchez, et al., 2020; Muñoz et al., 2008;
470 Valiente-Banuet et al., 2009; Vázquez, 2019), muchos de ellos de índole biológico. Este
471 estudio ha permitido avanzar hacia el objetivo prioritario de identificar espacialmente la
472 distribución de la cobertura vegetal y las actividades de origen humano del municipio de
473 Zapotitlán, hasta un tercer nivel de agregación (Tabla 1), integrando la composición de
474 especies (Apéndice 1), en un mapa digital conformado por 17 categorías de cobertura vegetal

475 y uso del terreno (CVUT) en escala 1:50,000 (Figura 2). La aproximación metodológica
476 desarrollada, permitió establecer un flujo de trabajo a partir de información generada por
477 percepción remota, el uso de bases de datos de acceso libre y de proyectos previos, extenso
478 trabajo de campo, y una ruta de clasificación semiautomatizada que facilitan la generación de
479 resultados con una óptima calidad en períodos de tiempo más corto. Contar con la cartografía
480 digital de la CVUT, permitirá disponer de una base espacial actualizada para el desarrollo de
481 proyectos de investigación científica, de planeación territorial y de manejo integral de los
482 ecosistemas (conservación de áreas prioritarias, aprovechamiento sustentable y recuperación
483 de zonas degradadas), así como el establecimiento de un sistema de monitoreo de la dinámica
484 del cambio de cobertura y uso del terreno, a nivel local.

485 Lo anterior es un tema crucial debido a que es importante identificar las clases de
486 cobertura vegetal con mayor riesgo de transformación y degradación por efecto de las
487 actividades humanas. El mapa de CVUT muestra que, entre ellas podrían estar, la tetechera de
488 *Cephalocereus tetetzo*, el izotal de *Yucca periculosa*, el mezquital de *Prosopis laevigata*, el
489 izotal de *Beaucarnea gracilis* y el mexical, ya que colindan con las zonas de producción
490 agrícola. Por otra parte, a partir del establecimiento de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán-
491 Cuicatlán (SEMARNAT y CONANP, 2013), en diversas comunidades se han desarrollado
492 actividades encaminadas a la conservación, la recuperación y el aprovechamiento de los
493 ecosistemas, en colaboración con diversas instituciones públicas y privadas (Vázquez, 2019),
494 por lo que también es importante evaluar la contribución de dichas actividades en la dinámica
495 del cambio de cobertura y uso del terreno (Leija et al., 2020; Von Thaden et al., 2020).

496 En conclusión, elaborar la cartografía de la distribución de la cobertura vegetal y
497 el uso del terreno para el municipio de Zapotitlán, integrando la relación espacial que hay
498 entre las actividades productivas, el aprovechamiento de los recursos vegetales y la
499 distribución espacial de las asociaciones vegetales es una importante base para entender cómo

500 ha sido el proceso de modificación o conversión de la cobertura del terreno en términos
501 históricos. Lo anterior sugiere la necesidad de identificar, cuantificar y analizar las
502 modificaciones que ha sufrido la cobertura vegetal en el tiempo por efecto del cambio de uso
503 del terreno, analizando las causas que lo han desencadenado y las condiciones sociales y
504 económicas en torno a ello, con la intención de brindar elementos que favorezcan su manejo y
505 conservación a nivel local y regional.

506 **Agradecimientos**

507 Este trabajo forma parte de la tesis doctoral de la primera autora por lo que
508 agradece al Posgrado en Ciencias Biológicas, de la Universidad Nacional Autónoma de
509 México (UNAM). Asimismo, los autores agradecen a los pobladores, a las autoridades
510 municipales de Zapotitlán y de Bienes Comunales de Zapotitlán Salinas, Puebla y a la
511 Asociación Chakaan Occidente S. C., por las facilidades brindadas para el desarrollo del
512 trabajo. Al Macroproyecto Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano, de la UNAM SDEI-
513 PTID-02 y a los proyectos IN212407, IN211410, IN225916, IN225010 del PAPIIT-DGAPA-
514 UNAM, y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
515 (CONABIO; JM002, JM003, JM009 y JM010), por el financiamiento otorgado. Finalmente, a
516 tres revisores anónimos y al Dr. Guillermo Ibarra Manríquez, Editor Asociado, que hicieron
517 valiosos comentarios a las versiones preliminares del documento.

518 **Referencias**

- 519 Adams, B., Iverson, L., Matthews, S., Peters, M., Prasad, A. y Hix, D. M. (2020). Mapping
520 forest composition with landsat time series: An evaluation of seasonal composites and
521 harmonic regression. *Remote Sensing*, 12, 610. <http://doi.org/10.3390/rs12040610>
- 522 Aldalur, B. y Santamaría, M. (2002). Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de*
523 *Teledetección*, 17, 31–42. <http://www.aet.org.es/revistas/revista17/AET17-04.pdf>
- 524 Arias-Toledo A. A., Valverde, V. M. T. y Reyes, S. J. (2000). *Las plantas de la región de*

525 *Zapotitlán Salinas*. México, D. F.: SEMARNAP.

526 Aronoff, S. (2005). *Remote sensing for GIS managers*. Redlands, California, EUA:
527 Environmental Systems Research.

528 Bhatnagar, S., Gill, L., Regan, S., Naughton, O., Johnston, P., Waldren, S. y Ghosh, B.
529 (2020). Mapping vegetation communities inside wetlands using Sentinel-2 imagery in
530 Ireland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88,
531 102083. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102083>

532 Breinman, L. y Cutler, A. (2018). Package ‘randomForest’. Breinman and Cutler’s Random
533 Forest for Classification and Regression. Recuperado 25 abril, 2020 de:
534 <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/>

535 Casas, A., Camou, A., Otero-Arnaiz, A., Rangel-Landa, S., Cruse-Sanders, J., Solís, L.,
536 Torres, I., Delgado, A., Moreno-Calles, A. I., Vallejo, M., Guillén, S., Blancas, J., Parra,
537 F., Farfán-Heredia, B., Aguirre-Dugua, X., Arellanes, Y. y Pérez-Negrón, E. (2014).
538 Manejo tradicional de biodiversidad y ecosistemas en Mesoamérica: el Valle de Tehuacán.
539 *Investigación Ambiental*, 6, 23–44. <https://www.researchgate.net/publication/314090302>

540 Casas, A., Lira, R., Torres, I., Delgado, A., Moreno-Calles, A. I., Rangel-Landa, S., Blancas,
541 J., Larios, C., Solís, L., Pérez-Negrón, E., Vallejo, M., Parra, F., Farfán-Heredia, B.,
542 Arellanes, Y. y Campos, N. (2016). Ethnobotany for sustainable ecosystem management: a
543 regional perspective in the Tehuacán Valley. En R. Lira, A. Casas y J. Blancas (Eds),
544 *Ethnobotany of Mexico* (pp. 179–206). New York, New York: Springer.

545 Cheung-Wai, Ch. J. y Paellinckx, D. (2008). Evaluation of random forest and adaboost tree-
546 based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using
547 airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2999–3011.
548 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.011>

549 Chilar, J. y Jansen, L. J. (2001). From land cover to land use: a methodology for efficient land

550 use mapping over large areas. *Professional Geographer*, 53, 275–289.

551 <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00285>

552 Cobos, M. E., Townsend, P. A., Barve, N. y Osorio-Olvera, L. (2019). Kuenm: An R package
553 for detailed development of ecological niche models using Maxent. *Peer J*, 7, e6281

554 <https://peerj.com/articles/6281/>

555 CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2020).
556 Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Recuperado el 8 de
557 abril, 2020 de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

558 Congalton, R. G. y Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data*
559 *Principles and Practices*. 3a ed. Boca Raton, FL. CRC Press.

560 Congedo, L. (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.
561 <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

562 Cuervo-Robayo, A. P., Téllez, V. O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S.,
563 Manjarrez, J. y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate
564 surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34, 2427–2437. Recuperado el
565 24 abril, 2020 de: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.3848>

566 Dávila, P., Arizmendi, M. C., Valiente-Banuet, A., Villaseñor, J. L., Casas, A y Lira, R.
567 (2002). Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biodiversity and*
568 *Conservation*, 11, 421–442.

569 EIONET (European Topic Centre on Land Use and Spatial Information). (2020).
570 Recuperada el 02 junio, de 2020 de: <https://inspire.ec.europa.eu/theme/lc>

571 Franco, R. (2017). *Composiciones LANDSAT en ArcGis. Guía Básica*. México, D. F.
572 Recuperado el 12 abril, 2020 de <http://mixdyr.wordpress.com>

573 García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para*
574 *adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México, D. F.: Instituto de

575 Geografía UNAM.

576 Ghosh, A., Sharma, R. y Joshi, P. K. (2014). Random forest classification of urban landscape
577 using Landsat archive and ancillary data: Combining seasonal maps with decision level
578 fusión. *Applied Geography*, 48, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.003>

579 Gómez-Pompa, A. (1965). La vegetación de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de*
580 *México*, 29, 76–120.

581 González-Medrano, F. (2003). *Las comunidades vegetales de México*. México, D. F.: INE–
582 SEMARNAT.

583 González-Medrano, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*.
584 México, D. F.: INE-SEMARNAT.

585 Guevara, S. (2018). *Un nuevo patrimonio mundial el Valle de Tehuacán – Cuicatlán: hábitat*
586 *originario de Mesoamérica*. Instituto Nacional de Ecología, México. Recuperado el 03 de
587 marzo, 2020: [https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/transparencia-inecol/17-ciencia-](https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/transparencia-inecol/17-ciencia-hoy/800-un-nuevo-patrimonio-mundial-el-valle-de-tehuacan-cuicatlan-habitat-originario-de-mesoamerica)
588 [hoy/800-un-nuevo-patrimonio-mundial-el-valle-de-tehuacan-cuicatlan-habitat-originario-](https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/transparencia-inecol/17-ciencia-hoy/800-un-nuevo-patrimonio-mundial-el-valle-de-tehuacan-cuicatlan-habitat-originario-de-mesoamerica)
589 [de-mesoamerica](https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/transparencia-inecol/17-ciencia-hoy/800-un-nuevo-patrimonio-mundial-el-valle-de-tehuacan-cuicatlan-habitat-originario-de-mesoamerica)

590 Heywood, V. H. (1954). El concepto de asociación en las comunidades rupícolas. *Anales*
591 *Instituto Botánico A. J. Cavanilles*, 11, 463–481.

592 Hijmans, R. J., van Etten, J., Summer, M., Cheng, J., Bevan, R., Bivand, R., Busetto, L.,
593 Canty, M., Forrest, D., Ghosh, A., Goliher, D., Gray, J., Greenberg, J. A., Hiemstra, P.,
594 Hingee, K., Karney, Ch., Mattiuzzi, M., Mosher, S., Nowosad, J., Pebesma, E., Perpignan-
595 Lamigueiro, O., Racine, E. B., Rowlingson, B., Shortridge, A., Venables, B. y Wueest, R.
596 (2019). Package raster. Geographic Data Analysis and Modeling. Recuperado 24 abril,
597 2020 de: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>

598 Holloway, J. y Mangersen, K. (2018). Statistical machine learning methods and remote
599 sensing for sustainable development goals: a review. *Remote Sensing*, 10, 1–

- 600 21. <https://doi.org/10.3390/rs10091365>
- 601 INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2002). *Conjunto de datos geológicos*
602 *vectoriales E1406, escala 1:250 000, serie I*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional
603 de Estadística y Geografía.
- 604 INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). *Conjunto de datos vectoriales*
605 *de información topográfica escala 1:50 000, serie III*. México, Aguascalientes, México:
606 Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- 607 INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017a). *Guía para Interpretación de*
608 *Cartografía. Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI*. Aguascalientes,
609 México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- 610 INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017b). *Conjunto de datos vectoriales*
611 *de la carta de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI*. Aguascalientes,
612 México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- 613 Jansen, L. J. M. y Di Gregorio, A. (2002). Parametric Land Cover Classification and Land
614 Use Classification as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems*
615 *and Environment*, 91, 89–100. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00243-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00243-2)
- 616 Jardel, E. J., Maass, M., Rivera-Monroy, V. H. (2013). *La investigación ecológica a largo*
617 *plazo en México*. Jalisco, México: Universidad de Guadalajara, Red Mexicana de
618 Investigación Ecológica a Largo Plazo, Editorial Universitaria.
- 619 Kamusoko, C. (2019). *Remote Sensing Image Classification in R*. Springer Geography.
620 <http://doi.org/10.1007/978-981-13-8012-9>
- 621 Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. *Journal of*
622 *Statistical Software*, 28, 1–26. <https://www.jstatsoft.org/article/view/v028i05>
- 623 Lambin, E. F. y Geist, H. J. (2006). *Land-Use and Land Cover Change. Local Processes and*
624 *Global Impacts*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

625 Leija, E. G., Valenzuela-Ceballos, S. I., Valencia-Castro, M., Jiménez-González, G.,
626 Castañeda-Gaytán, G., Reyes-Hernández, H. y Mendoza, M. E. (2020). Análisis de cambio
627 en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región centro-norte de México. El caso de la
628 cuenca baja del río Nazas. *Ecosistemas*, 29, 1826. <http://doi.org/10.7818/ECOS.1826>

629 Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. y Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image*
630 *Interpretation*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

631 López, E., Mendoza, M. E. y Bocco, G. (2010). Cobertura Vegetal y Uso del Terreno. En S.
632 Cram, L. Galicia e I. Israde-Alcántara (Eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo:*
633 *Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental* (pp. 54–59). Ciudad de México,
634 México, Morelia, Michoacán: Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad
635 Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

636 Manzo-Delgado, L. y Meave, J. A. (2003). La vegetación vista desde el espacio: la fenología
637 foliar a través de la percepción remota. *Revista Ciencia*, 54, 3, 18–28.
638 https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/54_3/vegetacion_vista_espacio.pdf

639 Martínez, E. y Galindo-Leal, C. (2002). La vegetación de Calakmul, Campeche, México:
640 clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71,
641 7–32.

642 McAuliffe, J. R., Sundt, P. C., Valiente-Banuet, A., Casas, A. y Viveros, J. L. (2001). Pre-
643 columbian soil erosion persistent ecological changes and collapse of a subsistence
644 agricultural economy in the semi-arid Tehuacan Valley Mexico's 'Cradle of Maize'.
645 *Journal of Arid Environments*, 47, 47–75. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0691>

646 MacNeish R. S. (1992). *The origins of agriculture and settled life*. Norman y Londres:
647 University of Oklahoma Press.

648 Medina-Sánchez, J., McLaren, S. J., Ortega-Ramírez, J. y Valiente-Banuet, A. (2020).
649 Tectono-stratigraphic basin evolution in the Tehuac_an-Mixteca highlands, south western
650 México. *Heliyon*, 6, 1–18. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03584>
651 Meyer, D., Dimitriadou, E., Hornik, K. Weingessel, A., Leisch, F., Chang, Ch. y Lin, Ch.
652 (2019). Package ‘e1071’. Misc Functions of the Department of Statistics, Probability
653 Theory Group, TU, Wein. Recuperado 24 de abril, 2020 de: [https://cran.r-](https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/e1071.pdf)
654 [project.org/web/packages/e1071/e1071.pdf](https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/e1071.pdf)
655 Miranda, F. (1952). *La vegetación de Chiapas*. 2 vols. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Ediciones
656 del Gobierno del Estado.
657 Miranda, F. y Hernández-X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación.
658 *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28, 29–179.
659 Montaña, A. N. M., García-Sánchez, R., Ochoa-de la Rosa, G. y Monroy-Ata, A. (2006).
660 Relación entre la vegetación arbustiva, el mezquite y el suelo de un ecosistema semiárido
661 en México. *Terra Latinoamericana*, 24, 193–205.
662 <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108006.pdf>
663 Montaña, A. N. M. y Monroy, A. (2000). Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y
664 semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*, XXVI, 26–37.
665 Mooney, H. A. y Harrison, A. T. (1972). The vegetation gradient on the lower slopes of the
666 Sierra San Pedro Martir in northwest Baja California. *Madroño*, 21, 439–445.
667 Muñoz, I. D. J., Horta, P. G., López, G. F., Hernández, M. M. y Soler, A. A. (2007). El Valle
668 de Zapotitlán Salinas, Puebla: Marco geográfico regional. En: M. C. Arizmendi, G. Ávila,
669 F. López, M. Murguía, S. Rodríguez y S. Solórzano (Eds), *Deterioro ambiental en zonas*
670 *áridas. Diez años de experiencia multidisciplinaria* (pp. 21–35). Tlalnepantla, México:
671 FES Iztacala, UNAM.
672 Muñoz, I. D. J., López, F., Hernández, M. M., Soler, A. A. y López, G.J. (2008). Impacto de

673 la pérdida de la vegetación en las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*,
674 27, 237–246. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-
675 57792009000300008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-57792009000300008&lng=es&nrm=iso)

676 Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A.,
677 Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. y
678 Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A
679 Report of the Science-Policy Interface*. Bonn, Germany: United Nations Convention to
680 Combat Desertification (UNCCD).

681 Osorio, B. O., Valiente-Banuet, A., Dávila, P. y Medina, R. (1996). Tipos de vegetación y
682 diversidad β en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. *Boletín de la Sociedad
683 Botánica de México*, 59, 35–38.

684 Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International
685 Journal of Remote Sensing*, 26, 217–222. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>

686 Paredes-Flores, M., Lira, S. R. y Dávila, A. P. (2007). Estudio etnobotánico de Zapotitlán
687 Salinas, Puebla. *Acta Botánica Mexicana*, 79, 13–61.
688 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512007000200002

689 Pereira e Silva, L., Campos, X. A. P., Marques da Silva, R. y Guimaraes, S. C.A. (2020).
690 Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin
691 in northeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 21, 1–13.
692 <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00811>

693 Pérez-Valladares, C. X., Velázquez, A., Moreno-Calles, A. I., Mas, J. F., Torres-García I.,
694 Casas, A., Rangel-Landa, S., Blancas, J., Vallejo, M. y Téllez-Valdés, O. (2019). An
695 expert knowledge approach for mapping vegetation cover based upon free access
696 cartographic data: the Tehuacan-Cuicatlan Valley, Central Mexico. *Biodiversity and
697 Conservation*, 28, 1361–1388. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01723-w>

698 Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura,
699 M. y Araujo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton,
700 New Jersey, USA: Princeton University Press.

701 Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of
702 species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
703 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

704 Priego-Santander, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). Propuesta para la
705 generación automatizada de unidades de paisaje, fundamentos y métodos. México. D. F.:
706 SEMARNAT, CIGA–UNAM.

707 Reyes-Palomeque, G., Dupuy, J. M., Portillo-Quintero, C. A., Andrade, J. L., Tun-Dzul, F. J.,
708 & Hernández-Stefanoni, J. L. (2021). Mapping forest age and characterizing vegetation
709 structure and species composition in tropical dry forests. *Ecological Indicators*, 120,
710 106955. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106955>

711 Ripley, B. (2020). Package ‘nnet’. Feed-Forward Neural Networks and Multinomial Log-
712 Linear Models. Recuperado el 30 abril, 2020 de:
713 <https://cran.microsoft.com/web/packages/nnet/nnet.pdf>

714 Rodriguez-Galiano, V. F. y Chica-Rivas, M. (2014). Evaluation of different machine learning
715 methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat
716 images and Digital Terrain Models. *International Journal of Digital Earth*, 7, 492–509.
717 <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.748848>

718 Rotenberg, E. y Yakir, D. (2010). Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System.
719 *Science*, 327, 451–454.

720 Rzedowski, J., Guzmán, G., Hernández, A. y Múñiz, R. (1964). Cartografía de los principales
721 tipos de vegetación de la mitad septentrional del Valle de México. *Anales de la Escuela*
722 *Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México*, 13, 31–57.

723 Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. edición digital. México, D. F.: CONABIO.

724 Sánchez, P. L. (2007). *Diagnóstico y consecuencias ecológicas de la extracción y consumo de*
725 *leña en Colonia San Martín, Valle de Zapotitlán, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad
726 de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Estado de
727 México, México.

728 Schimel, D. S. (2010). Drylands in the Earth System. *Science*, 327, 418–419.

729 SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) y CONANP (Comisión
730 de Áreas Naturales Protegidas). (2013). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera*
731 *Tehuacán-Cuicatlán*. México, D. F.: SEMARNAT, CONANP.

732 Sharma, R. C., Hará, K. y Tateishi, R. (2017). High-resolution vegetation mapping in Japan
733 by combinig Sentinel-2 and Landsat 8 based multi-temporal datasets through machine
734 learning and cross-validation approach. *Land*, 6, 1–11.
735 <https://doi.org/10.3390/land6030050>

736 SRTM. (2018). *SRTM 90 m Digital Elevation Database*. Recuperado el 30 de abril, 2020 de:
737 <http://srtm.csi.cgiar.org/>

738 Teme, RDC. (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing.

739 Téllez, V. O. (2019). *Base de Datos de la Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, México*.
740 Laboratorio de Recursos Naturales-UBIPRO. FES Iztacala UNAM. México.

741 Valiente-Banuet, A., Casas, A., Alcántara, A., Dávila, P., Flores-Hernández, N., Arizmendi,
742 M. C., Villaseñor, J. L. y Ortega, R. J. (2000). La vegetación del Valle de Tehuacán-
743 Cuicatlán. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 67, 24–74.
744 <https://doi.org/10.17129/botsci.1625>

745 Valiente-Banuet, A, Solis, L., Dávila, P., Arizmendi, M. C., Silva, P. C., Ortega-Ramírez, J.,
746 Treviño, C. J., Rangel-Landa, S. y Casas, A. (2009). *Guía de la vegetación del Valle de*
747 *Tehuacán-Cuicatlán*. México, D. F.: UNAM, CONABIO, INAH, UAT, Fundación para la

748 Reserva de la Biósfera Tehuacán–Cuicatlán.

749 Vallejo, M., Casas, A., Pérez-Negrón, E., Moreno-Calles, A. I., Hernández-Ordoñez, O.,
750 Téllez, O. y Dávila, P. (2015). Agroforestry systems of the lowland alluvial valleys of the
751 Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve: an evaluation of their biocultural capacity.
752 *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11, 1–18. [https://doi.org/10.1186/1746-4269-](https://doi.org/10.1186/1746-4269-11-8)
753 [11-8](https://doi.org/10.1186/1746-4269-11-8)

754 Vázquez, D. T. P. (2019). *Intervenciones y transformaciones en la organización comunitaria*
755 *y el manejo de los recursos comunes en Zapotitlán Salinas, Puebla*. Tesis de Maestría en
756 Ciencias de la Sostenibilidad. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de
757 México, México.

758 Vega, G. A., López-García, J. y Manzo, D. L. L. (2008). Análisis espectral y visual de
759 vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas
760 digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones*
761 *Geográficas*, 67, 59–75.
762 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000300005

763 Velasco-Molina, A. (1991). *Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo*.
764 México, D. F.: Limusa.

765 Von Thaden, J. J., Laborde, J., Guevara, S. y Mokondoko-Delgadillo, P. (2020). Dinámica de
766 los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal en la Reserva de la Biósfera Los
767 Tuxtla (2006-2016). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913190.
768 <http://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3190>

769 Xie, G., Niculecu, S., Lam, Ch., SEveno, E. (2019). Machine learning methods and
770 classification of vegetation in Brest France. *Remote Sensing Technologies and*
771 *Applications in Urban Environments*, IV, 111570J. <https://doi/10.1117/12.2533436>

772 Xu, T. y Hutchinson, M. (2013). ANUCLIM v. 6.1. Institute of Advanced Studies. Fenner

- 773 School of Environment and Society. Australia National University.
- 774 Yeo, S., Lafon, V., Alard, D., Curti, C., Dehouck, A. y Benot, M. L. (2020). Classification
775 and mapping of saltmarsh vegetation combining multispectral images with field data.
776 *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236, 106643.
777 <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106643>
- 778 Zaffar, A., Safriel, U., Niemeijer, D., y White, R. (2005). *Ecosistemas y Bienestar Humano.*
779 *Síntesis sobre desertificación. Informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio*
780 Washington, D. C., USA: World Resources Institute.
- 781 Zavala, H. J. A. (1980). *Estudios ecológicos en el Valle semiárido de Zapotitlán de las*
782 *Salinas, Puebla; clasificación de la vegetación.* Tesis de Licenciatura. Facultad de
783 Ciencias, UNAM. México, D. F.

784 Tabla 1. Leyenda jerarquizada en tres niveles. El nivel 1 distingue entre vegetación natural
 785 y usos del terreno. El nivel 2 muestra el sistema de clasificación de los tipos de uso del
 786 suelo y vegetación (INEGI, 2107a). El nivel 3 presenta las clases del mapa de cobertura
 787 vegetal y uso del terreno (CVUT), según Valiente-Banuet et al. (2009).

Clase	CVUT (clave) (área)	Descripción (Número de familias/especies)
Cobertura Vegetal Natural		
Bosque de encino		
1	Bosque de <i>Quercus magnoliifolia</i> (BQm) (782.4 ha/1.8%)	En barrancas y laderas, en zona de contacto de calizas y lutitas con areniscas y de areniscas con conglomerados, entre 1700 y 1800 m s.n.m. La especie dominante es un árbol de 3-12 m, caducifolio (36/134).
Matorral desértico micrófilo		
2	Matorral espinoso con espinas laterales (MEel) (2792.9 ha/6.5%)	En piedemonte y planicies con lutitas y areniscas, ca. de 1500 m s.n.m. Dominan arbustos espinosos, caducifolios (52/182).
3	Matorral de <i>Echinocactus platyacanthus</i> (M_Ep) (450.6 ha/1%)	En laderas de lutitas con areniscas y afloramientos de calizas, de 1600 a 1800 m de altitud. La especie dominante presenta individuos de hasta 2.5 m (26/55).
4	Matorral crasirosulifolio de <i>Dasyliirion</i> y <i>Agave</i> (MCR_DA) (606.8 ha/1.4%)	En laderas y cimas de los cerros formados por calizas, de 1700 a 1900 m s.n.m. Predominan plantas con hojas en forma de roseta, con o sin tallos evidentes (41/107).
Matorral crasicaule		
5	Cardonal de <i>Cephalocereus columna-trajani</i> (Car_Cct) (417.4 ha/1%)	En laderas formadas por lutitas con areniscas, entre 1500 y 1700 m de altitud. La especie dominante alcanza los 10 m, con tallo monopódico (30/95).
6	Cardonal de <i>C. fulviceps</i> (Car_Cf) (2544 ha/5.9%)	En mesas, lomas, colinas y laderas en zonas de contacto de lutitas y areniscas y conglomerados con calizas, de 1700-1900 m s.n.m. La especie dominante alcanza hasta 10 m en el tronco principal, a partir del cual ramifica profusamente (54/231).
7	Tetechera de <i>C. tetetzo</i> (Tet_Ct) (9129 ha/21.2%)	En lomeríos, laderas, pie de monte y planicies con lutitas y areniscas y ocasionalmente calizas o conglomerados, entre 700 y 1500 m de altitud. La especie dominante es una cactácea columnar muy ramificada, de hasta 8 m (78/503).
8	Chichipera <i>Polaskia chichipe</i> (Ch_Pch) (1248.2 ha/2.9%)	En cerros y laderas formados por basalto con brecha volcánica, de 1700 a 1900 m s.n.m. La especie dominante es un cactus arborescente, de 3 a 5 m, muy ramificado (27/103).
Matorral desértico rosetófilo		

9	Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i> (Iz_Bg) (3289 ha/7.6%)	En laderas, piedemonte y planicies con una alta diversidad litológica (calizas, conglomerados, lutitas y areniscas, esquistos, basaltos y brechas volcánicas), a 1600 m s.n.m. La especie dominante tiene la base leñosa muy ensanchada, de hasta 2 m de diámetro (61/252).
10	Izotal de <i>Yucca periculosa</i> (Iz_Yp) (8852.9 ha/20.5%)	En laderas, piedemonte y planicies formados por lutitas y areniscas, hasta los 1700 m s.n.m. La especie dominante, de hasta 4 m, es ramificada, con hojas sin espinas laterales y una espina terminal (62/399).
Selva baja caducifolia		
11	Selva baja caducifolia (SBC) (241.7 ha/0.6%)	En laderas altas y cimas de los cerros formados por lutitas y areniscas, desde los 1700 m s.n.m. Predominan especies arbóreas caducifolias, de hasta 10 m (28/111).
Bosque de mezquite		
12	Mezquital de <i>Prosopis laevigata</i> (Mez_Pl) (23 ha/0.1%)	Sobre un sistema de terrazas fluviales altamente fragmentadas, entre 1450 y 1550 m de altitud. La especie dominante es un árbol perennifolio, de 2-7 m; una alta proporción de las especies con espinas (36/114).
Chaparral		
13	Mexical (Mex) (4005 ha/9.3%)	En laderas con lutitas y areniscas o calizas; escarpes con areniscas y conglomerados, de 1900 a 2400 m s.n.m. Constituido por arbustos perennifolios, con hojas esclerófilas y que no sobrepasan los 2 m (63/304).
Uso del Terreno u otros elementos		
Área agrícola		
14	Zona agrícola (ZA) (3841 ha/8.9%)	Áreas de producción de cultivos que son obtenidos para su utilización por el ser humano, ya sea como alimentos, forrajes, ornamental, o industrial (91/457).
Asentamientos humanos		
15	Asentamientos humanos (AH) (544 ha/1.3%)	Sitio específico donde se establecen viviendas y otras estructuras, en donde se llevan a cabo las actividades sociales y económicas, así como vialidades (60/229).
Área desprovista de vegetación		
16	Sin cobertura (SC) (2204.9 ha/5.1%)	Comunidades vegetales no visibles o detectables. Incluye el cauce del río principal, bancos de material, salineras y sitios sin vegetación (53/248).
17	Sin cobertura, con suelo degradado (SC_sd) (2173 ha/5%)	Sitios desprovistos de vegetación en donde el suelo o la roca quedan expuestos (45/237).

789 Tabla 2. Matriz de confusión entre clases del mapa final de CVUT y los datos de referencia (valores en píxeles). 1) Bosque de *Quercus magnoliifolia*; 2)
 790 Matorral Espinoso con espinas laterales; 3) Matorral de *Echinocactus platyacanthus*; 4) Matorral Crasi-rosulifolio de *Dasyilirion* y *Agave*; 5) Cardonal de
 791 *Cephalocereus columna-trajani*; 6) Cardonal de *C. fulviceps*; 7) Tetechera de *C. tetetzo*; 8) Chichipera de *Polaskia chichipe*; 9) Izotal de *Beaucarnea gracilis*;
 792 10) Izotal de *Yucca periculosa*; 11) Selva baja caducifolia; 12) Mezquital de *Prosopis laevigata*; 13) Mexical; 14) Zona agrícola; 15) Asentamientos humanos;
 793 16) Sin cobertura; 17) Sin cobertura, con suelo degradado; Sen) Sensibilidad (exactitud de usuario); Esp) Especificidad.

		Clase mapa																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Total
Clase real (datos de referencia)	1	257			2	31				76				125					491
	2		665	39		57	10	257			271	12			35	1	63	27	1437
	3	8	35	156	10	124	90	62			311				27		2	5	830
	4		151	65	284	2	36	43	17	48	78			17	20				761
	5	22	250	103		645	80	177			312	15			46	23	28	19	1720
	6	78	225	156	86	275	3282	15	278	59	397			16	52		30	14	4963
	7	70	241	3			1	8076	1	75	339			196	10				9012
	8		28	9			7		479	256	15			58					852
	9	78	103	66	41		2	252	190	1524	339	27		284					2906
	10	78	1	15	94	3	129	125	8	51	4393			369					5266
	11	3	61					259			97	319		4	4				747
	12		10					307				16	96		132	5			566
	13	18			3				25	211			5	1055	1		4	17	1339
	14	58	202		7	5	142	35	9	226	24			7	2465	101	206	78	3565
	15	12				3				5	12				66	1168	103	46	1415
	16		2			3			5						326	3	455	178	972
	17		9			3			3						379	8	187	427	1016
Total	682	1983	612	527	1151	3779	9616	1007	2531	6588	389	101	2131	3563	1309	1078	811	37858	
Sen	0.38	0.34	0.25	0.54	0.56	0.87	0.84	0.48	0.60	0.67	0.82	0.95	0.50	0.69	0.89	0.42	0.53	0.61	
Esp	0.99	0.98	0.98	0.99	0.97	0.95	0.97	0.99	0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98	

Exactitud total: 0.68; índice de Kappa: 0.63

795 Apéndice 1. Listado de especies por clase de cobertura vegetal y uso del terreno. El asterisco
796 indica las especies que caracterizan a cada clase. 1) Bosque de *Quercus magnoliifolia*; 2)
797 Matorral espinoso con espinas laterales; 3) Matorral de *Echinocactus platyacanthus*; 4)
798 Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyilirion* y *Agave*; 5) Cardonal de *Cephalocereus columna-*
799 *trajani*; 6) Cardonal de *C. fulviceps*; 7) Tetechera de *C. tetetzo*; 8) Chichipera de *Polaskia*
800 *chichipe*; 9) Izotal de *Beaucarnea gracilis*; 10) Izotal de *Yucca periculosa*; 11) Selva baja
801 caducifolia; 12) Mezquital de *Prosopis laevigata*; 13) Mexical; 14) Zona agrícola; 15)
802 Asentamientos humanos; 16) Sin cobertura; 17) Sin cobertura, con suelo degradado.

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Acanthaceae																	
<i>Anisacanthus gonzalezii</i>						X								X			
<i>Anisacanthus quadrifidus</i>		X				X	X			X				X			
<i>Anisacanthus tulensis</i>														X			
<i>Carlowrightia arizonica</i>															X		
<i>Carlowrightia neesiana</i>		X			X	X	X							X			
<i>Carlowrightia pringlei</i>					X		X			X				X			
<i>Dyschoriste purpusii</i>		X					X			X							
<i>Holographis ehrenbergiana</i>							X										
<i>Holographis pueblensis</i>							X			X				X	X		X
<i>Justicia candicans</i>							X			X	X	X	X	X	X		
<i>Justicia furcata</i>		X															
<i>Justicia gonzalezii</i>		X	X		X	X	X			X				X	X		
<i>Justicia mexicana</i>		X		X			X	*	X	X		X		X	X	X	X
<i>Justicia pilosella</i>											X						
<i>Justicia ramosa</i>		X			X									X	X		
<i>Justicia sessilis</i>		X				X	X			X		X		X			
<i>Justicia strobiloglossa</i>							X										
<i>Ruellia abbreviata</i>														X			
<i>Ruellia californica</i>		X					X										
<i>Ruellia hirsutoglandulosa</i>		X			X	*	X			*	X	X		X	X	X	
<i>Ruellia lactea</i>		X															
<i>Ruellia nudiflora</i>					X		X							X			
<i>Ruellia parryi</i>															X		
<i>Ruellia puberula</i>										X							
<i>Ruellia rosea</i>							*			X				X		X	X
<i>Siphonoglossa ramosa</i>										*							
<i>Stenandrium verticillatum</i>									X								
<i>Tetramerium glandulosum</i>		X					X							X			
Aizoaceae																	
<i>Mesembryanthemum cordifolia</i>														X			
<i>Trianthema portulacastrum</i>							X										
Amaranthaceae																	
<i>Amaranthus hybridus</i>		X			X	X				X	X	X		X			
<i>Amaranthus spinosus</i>							X							X			
<i>Chenopodium berlandieri</i>																	X
<i>Chenopodium murale</i>							X			X				X		X	X
<i>Dysphania ambrosioides</i>		X						X						X		X	
<i>Froelichia interrupta</i>		X															
<i>Gomphrena decumbens</i>		X	X		X		X			X		X	X	X	X	X	X
<i>Gomphrena serrata</i>											X			X			

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Iresine calea</i>							*			X		X	X	X		X	X
<i>Iresine discolor</i>		X							X					X			
<i>Iresine nitens</i>		X									X			X	X		
<i>Iresine pringlei</i>						X	X										X
<i>Iresine rotundifolia</i>		X		X	X				X	X				X			X
<i>Iresine schaffneri</i>					X	X	X		X				X	X		X	X
<i>Salsola kali</i>											X						
Amaryllidaceae																	
<i>Allium cepa</i>														X			
<i>Allium sativum</i>														X			
<i>Zephyranthes chlorosolen</i>							X										
<i>Zephyranthes sessilis</i>													X				
Anacampserotaceae																	
<i>Talinopsis frutescens</i>							X										
Anacardiaceae																	
<i>Actinocheita filicina</i>					X	X				X							
<i>Actinocheita potentillifolia</i>	X				X	X	X			X				X	X		X
<i>Amphipterygium adstringens</i>							X										
<i>Cyrtocarpa procera</i>	X						X										
<i>Pistacia mexicana</i>									X				X				
<i>Pseudosmodingium andrieuxii</i>						X											
<i>Pseudosmodingium multifolium</i>	X	X		X	*		*									X	X
<i>Rhus chondroloma</i>							X	X		X			X			X	
<i>Rhus microphylla</i>							X										
<i>Rhus standleyi</i>									X	X						X	X
<i>Rhus virens</i>				X		X	X						*	X	X		X
<i>Schinus molle</i>	X	X					X	X	X	X			X	X	X	X	
<i>Spondias mombin</i>														X			
<i>Toxicodendron radicans</i>													X				X
Annonaceae																	
<i>Annona cherimola</i>														X			
Apiaceae																	
<i>Arracacia fruticosa</i>										X							
<i>Coriandrum sativum</i>														X			
<i>Cyclospermum leptophyllum</i>				X													
<i>Foeniculum vulgare</i>														X			
<i>Hydrocotyle bonariensis</i>							X										
<i>Hydrocotyle verticillata</i>							X								X		
<i>Petroselinum crispum</i>														X			
<i>Sanicula liberta</i>															X		
Apocynaceae																	
<i>Asclepias curassavica</i>										X							X
<i>Asclepias glaucescens</i>									X								
<i>Asclepias linaria</i>	X		X	X		X	X	X								X	X
<i>Asclepias lynchiana</i>								X		X							
<i>Asclepias oenotheroides</i>							X			X							
<i>Cascabela thevetioides</i>			X						X								
<i>Cynanchum foetidum</i>		X												X			

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Funastrum elegans</i>								X	X				X				
<i>Gonolobus grandiflorus</i>		X															
<i>Marsdenia coulteri</i>	X	X					X			X							
<i>Marsdenia parvifolia</i>							X							X			
<i>Marsdenia zimapanica</i>							X										
<i>Matelea caudata</i>							X										
<i>Matelea purpusii</i>						X											X
<i>Matelea trachyantha</i>							X			X	X	X		X	X	X	
<i>Metastelma angustifolium</i>														X	X		
<i>Metastelma macropodium</i>		X								X	X		X			X	
<i>Metastelma schlechtendalii</i>						X				X							
<i>Nerium oleander</i>														X			
<i>Plumeria rubra</i>	X						*			X	*		X	X	X	X	X
<i>Sarcostemma elegans</i>						X								X		X	X
<i>Vallesia glabra</i>		X					X					*		X			
Araceae																	
<i>Anthurium andraeanum</i>														X			
<i>Anthurium crassinervium</i>														X			
<i>Caladium bicolor</i>														X			
<i>Dieffenbachia picta</i>														X			
<i>Epipremnum aureum</i>														X			
<i>Monstera deliciosa</i>														X			
<i>Zantedeschia aethiopica</i>														X			
Araliaceae																	
<i>Aralia humilis</i>									X				X		X	X	
Arecaceae																	
<i>Brahea dulcis</i>			X		X	X	X	X					X		X		X
<i>Brahea nitida</i>					X	X	X	X					*		X		X
<i>Howea forsteriana</i>														X			
<i>Phoenix dactylifera</i>														X			
Asparagaceae																	
<i>Agave angustiarum</i>								X	X								
<i>Agave ghiesbreghtii</i>										X							
<i>Agave karwinskii</i>	X	*				*	*			X	X			X	X		X
<i>Agave kerchovei</i>	X	X		*	X	X	X	X		*			X	X	X	X	X
<i>Agave macroacantha</i>	X	X			*	*	*	X		*	X			X	X		
<i>Agave marmorata</i>	X	X			X	X	X	X		*	*	X	X	X	X	X	X
<i>Agave peacockii</i>		X	*	*	*	*	X		*	*				X	X		X
<i>Agave potatorum</i>		X	*	*	X	*	X		X	*	X			X	X	X	X
<i>Agave purpusii</i>										*							
<i>Agave roezliana</i>										*							
<i>Agave salmiana</i>		X				X	X		X	X			X	X	X	X	X
<i>Agave striata</i>															X		
<i>Agave stricta</i>		X		X		X	X	X		X	X			X	X	X	X
<i>Agave titanota</i>		X					X							X			
<i>Agave triangularis</i>		X			X	X	X			X					X		X
<i>Agave xylonacantha</i>		X	X				X	X									
<i>Beaucarnea gracilis</i>	X	X		X	*	X	*	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Beaucarnea purpusii</i>						X	X		X	X			X	X		X	X

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Beaucarnea stricta</i>		X												X	X		
<i>Dasyllirion acrotrichum</i>	X		X	*		X	X	X	X				X			X	
<i>Dasyllirion lucidum</i>		X						X									
<i>Dasyllirion serratifolium</i>				*		X	X		X	X			*			X	X
<i>Dracaena trifasciata</i>														X			
<i>Echeandia flavescens</i>		X					X		X						X		
<i>Echeandia mexicana</i>							X										
<i>Furcraea longaeva</i>									X								X
<i>Hemiphylacus latifolius</i>							X									X	
<i>Hemiphylacus mahindae</i>		X		X			X	X		X				X			
<i>Milla biflora</i>		X					X								X		
<i>Nolina humilis</i>															X		
<i>Nolina longifolia</i>				*									*				X
<i>Nolina parviflora</i>									X								
<i>Yucca baccata</i>										X							
<i>Yucca elephantipes</i>														X			
<i>Yucca mixteca</i>							X		X					X			
<i>Yucca periculosa</i>	X	X	*		X	X	*	*	X	*	X		X	X		X	X
Asphodelaceae																	
<i>Asphodelus fistulosus</i>															X		
Aspleniaceae																	
<i>Asplenium auriculatum</i>		X															
<i>Thelypteris puberula</i>													X				
Asteraceae																	
<i>Acourtia caltepecana</i>																	X
<i>Acourtia carpholepis</i>						X							X	X		X	
<i>Acourtia cordata</i>	X						X						X				
<i>Acourtia dugesii</i>						X											
<i>Acourtia fragrans</i>	X					X	X								X		
<i>Acourtia reticulata</i>		X														X	
<i>Acourtia scapiformis</i>				X									X	X			
<i>Acourtia tenoriensis</i>													X				
<i>Ageratina calaminthifolia</i>				X									X				
<i>Ageratina calophylla</i>																	X
<i>Ageratina espinosarum</i>			*				X	X	X	X			*			X	
<i>Ageratina liebmanni</i>									X								
<i>Ageratina mairetiana</i>								X									
<i>Ageratina oligocephala</i>													X				
<i>Ageratina tomentella</i>									X					X		X	X
<i>Ageratum corymbosum</i>													X				
<i>Ageratum paleaceum</i>									X								
<i>Ageratum tehuacanum</i>				X	X		X		X	X			X			X	X
<i>Ageratum tomentosum</i>							X			X			X	X			
<i>Aldama linearis</i>						X				X						X	
<i>Archibaccharis serratifolia</i>													X				
<i>Artemisia absinthium</i>														X			
<i>Artemisia ludoviciana</i>						X								X		X	
<i>Aster subulatus</i>													X	X			X
<i>Baccharis mexicana</i>									X							X	

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Baccharis pteronioides</i>						X											
<i>Baccharis salicifolia</i>							X							X	X		
<i>Baccharis serrifolia</i>								X	X								
<i>Baccharis sordescens</i>										X			X				
<i>Barkleyanthus salicifolius</i>							X						X				
<i>Bidens alba</i>														X			
<i>Bidens bicolor</i>																	X
<i>Bidens bigelovii</i>																	X
<i>Bidens sharpii</i>													X			X	
<i>Bidens squarrosa</i>													X				
<i>Brickellia problematica</i>				X									X				X
<i>Brickellia veronicifolia</i>		X					*			X				X			
<i>Calea ternifolia</i>										X						X	X
<i>Calyptocarpus vialis</i>									X								
<i>Carminatia alvarezii</i>										X						X	
<i>Chaptalia pringlei</i>				X									X				X
<i>Chromolaena pulchella</i>													X				
<i>Cirsium mexicanum</i>																	X
<i>Cirsium raphilepis</i>													X				
<i>Conyza canadensis</i>													X				
<i>Coreopsis cyclocarpa</i>									X					X			
<i>Coreopsis mutica</i>				X					X				X				
<i>Coreopsis oaxacensis</i>													X				
<i>Coreopsis parvifolia</i>																	X
<i>Cosmos bipinnatus</i>							X							X			
<i>Cosmos parviflorus</i>													X				
<i>Dahlia coccinea</i>			X	X				X	X	X			X		X		
<i>Dahlia merckii</i>							X										X
<i>Dendroviguiera eriophora</i>																	X
<i>Dyssodia papposa</i>																	X
<i>Flaveria cronquistii</i>					X		X								X		
<i>Flaveria linearis</i>							X										
<i>Flaveria pringlei</i>						X	X			X			X	X	X	X	
<i>Flaveria ramosissima</i>														X	X		
<i>Flaveria trinervia</i>	X	X					X			X		X		X	X	X	
<i>Florestina pedata</i>															X		
<i>Florestina purpurea</i>													X				X
<i>Florestina simplicifolia</i>		X					X	X	X				X	X		X	
<i>Galinsoga parviflora</i>													X				
<i>Gochnatia hypoleuca</i>		X				X	X	X		X			X	X		X	X
<i>Gochnatia obtusata</i>						X		X		X					X	X	X
<i>Gochnatia purpusii</i>				X													
<i>Gymnolaena chiapasana</i>							X										
<i>Gymnolaena oaxacana</i>	X	X				X	X	X		X			X		X		X
<i>Gymnosperma glutinosum</i>	X	X	X		X	X	X	X	*	X		X	X	X		X	X
<i>Heliomeris obscura</i>									X								
<i>Heliopsis annua</i>									X				X			X	
<i>Heliopsis buphthalmoides</i>													X				
<i>Heterosperma pinnatum</i>													X	X			

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Jefea pringlei</i>	X			X					X				X				X
<i>Koanophyllon gracilicaule</i>									X								
<i>Lasianthaea fruticosa</i>							X										
<i>Melampodium longipilum</i>	X					X				X							
<i>Montanoa leucantha</i>									X	X							X
<i>Montanoa mollissima</i>				X	X		*	X	X	X			X	X			X
<i>Montanoa tomentosa</i>	X							X	X	X	X	X	X	X		X	X
<i>Neurolaena lobata</i>										X					X		
<i>Parthenium bipinnatifidum</i>		X			X		X			X		X		X			X
<i>Parthenium hysterophorus</i>	X						X		X					X			
<i>Parthenium tomentosum</i>	X	X					X			X		X	X	X			
<i>Pectis haenkeana</i>										X						X	
<i>Perymenium discolor</i>				X					X				X				
<i>Perymenium mendezii</i>	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Pinaropappus roseus</i>									X								
<i>Piqueria trinervia</i>																	X
<i>Pittocaulon praecox</i>		X				X	X	X	X	X			X	X			X
<i>Pittocaulon velatum</i>							X										
<i>Pluchea odorata</i>										X							
<i>Pluchea salicifolia</i>										X				X			X
<i>Podachaenium pachyphyllum</i>			X														
<i>Porophyllum linaria</i>				X	X	X				X					X	X	
<i>Psacalium calvum</i>						X											
<i>Pseudognaphalium inornatum</i>													X				
<i>Pseudognaphalium liebmannii</i>													X				
<i>Pseudognaphalium semiamplexicaule</i>													X				
<i>Roldana angulifolia</i>														X			
<i>Roldana cordovensis</i>													X				
<i>Roldana ehrenbergiana</i>																X	
<i>Roldana hederifolia</i>														X			
<i>Roldana oaxacana</i>													X				
<i>Sanvitalia fruticosa</i>	X	*		X	X	*			X		X	X	X	X	X	X	X
<i>Sanvitalia ocymoides</i>												X	X				
<i>Sanvitalia procumbens</i>	X	X		X	X							X	X	X	X	X	X
<i>Schkuhria pinnata</i>																	X
<i>Sclerocarpus uniserialis</i>						X				X							
<i>Simsia lagascaeformis</i>										X		X					
<i>Simsia sanguinea</i>																X	
<i>Sonchus oleraceus</i>														X			
<i>Stevia aschenborniana</i>						X										X	
<i>Stevia caltepecana</i>													X				
<i>Stevia caracasana</i>													X				
<i>Stevia elatior</i>													X				
<i>Stevia latifolia</i>													X				
<i>Stevia lucida</i>									X	X				X		X	
<i>Stevia nepetifolia</i>													X				
<i>Stevia salicifolia</i>				X		X			X				X	X			
<i>Stevia viscida</i>									X								

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Steviopsis vigintisetata</i>						X			X								
<i>Tagetes erecta</i>														X			
<i>Tagetes lunulata</i>													X				
<i>Tagetes micrantha</i>										X							
<i>Tagetes tenuifolia</i>		X					X		X	X			X			X	
<i>Tanacetum parthenium</i>														X			
<i>Taraxacum officinale</i>														X			
<i>Tetrachyron brandegei</i>				X			X						X			X	
<i>Thymophylla aurantiaca</i>				X			X						X				
<i>Tithonia tubiformis</i>							X		X	X		X	X	X			
<i>Tridax coronopifolia</i>	X								X				X				X
<i>Tridax luisana</i>													X				
<i>Trixis parviflora</i>		X															
<i>Trixis pringlei</i>	X	X					X		X	X		X	X	X			
<i>Verbesina crocata</i>							X										
<i>Verbesina gracilipes</i>				X					X				X			X	
<i>Verbesina liebmanni</i>													X				
<i>Verbesina longipes</i>							X										
<i>Verbesina neotenoriensis</i>		*			*		*							X	X		
<i>Verbesina persicifolia</i>														X			
<i>Verbesina petrophila</i>							X										
<i>Verbesina tenoriensis</i>										X							
<i>Vernonanthura liatroides</i>						X							X				
<i>Vernonia salicifolia</i>						X			X							X	
<i>Viguiera dentata</i>	X	X			X		X		*	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Viguiera grammatoglossa</i>				X			X									X	
<i>Viguiera pinnatilobata</i>							X			X		X		X			
<i>Xanthium spinosum</i>													X				
<i>Xanthium strumarium</i>		X							X				X				
<i>Zaluzania montagnifolia</i>							X		X	X				X	X	X	X
<i>Zaluzania subcordata</i>									X				X			X	
<i>Zaluzania triloba</i>		X															
<i>Zinnia haageana</i>							X										
<i>Zinnia peruviana</i>	X	X			X		X		X	X	*	X	X	X	X	X	X
Aytoniaceae																	
<i>Plagiochasma crenulatum</i>																X	
Balsaminaceae																	
<i>Impatiens balsamina</i>														X			
Basellaceae																	
<i>Anredera vesicaria</i>						X								X			
Begoniaceae																	
<i>Begonia gracilis</i>														X			
Berberidaceae																	
<i>Berberis quinquefolia</i>						X	X			X			X				
Betulaceae																	
<i>Alnus acuminata</i>		X															
Bignoniaceae																	
<i>Amphilophium laxiflorum</i>									X								
<i>Handroanthus impetiginosus</i>							X										

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Jacaranda mimosifolia</i>														X		X	
<i>Parmentiera aculeata</i>														X			
<i>Tecoma stans</i>	X	X		X		X	X	X	X	X			X	X		X	X
Boraginaceae																	
<i>Antiphytum caespitosum</i>								X	X	X							
<i>Antiphytum heliotropioides</i>			X			X	X	X	X				X	X			X
<i>Bourreria andrieuxii</i>										X							
<i>Bourreria obovata</i>		X					X			X			X	X			
<i>Bourreria ovata</i>													X				
<i>Bourreria spathulata</i>		X			X		X			X			X	X		X	
<i>Ehretia latifolia</i>									X				X				X
<i>Heliotropium angiospermum</i>	X					X	X			X		X		X	X	X	
<i>Heliotropium calcicola</i>	X	X	X			X	X			X			X	X	X	X	X
<i>Heliotropium confertifolium</i>	X						X			X						X	X
<i>Heliotropium curassavicum</i>						X				X	X						
<i>Heliotropium foliosissimum</i>										X							
<i>Heliotropium limbatum</i>									X								X
<i>Heliotropium muticum</i>							X										
<i>Heliotropium procumbens</i>																	X
<i>Heliotropium pueblense</i>										X							
<i>Heliotropium ternatum</i>							X			X						X	X
<i>Lithospermum calcicola</i>						X			X								X
<i>Lithospermum calycosum</i>									X								
<i>Nama dichotoma</i>				X													X
<i>Nama pueblense</i>														X			
<i>Tiquilia canescens</i>							X			X							X
<i>Tournefortia hartwegiana</i>		X															
<i>Tournefortia mutabilis</i>	X						X			X				X		X	X
<i>Tournefortia volubilis</i>	X			X		X	X	X	X	X		X		X		X	
<i>Varronia curassavica</i>	X	*	X	X	*	*	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Varronia cylindrostachya</i>		X					X			X						X	
<i>Wigandia urens</i>							X	X		X	X	X	X		X		
Brassicaceae																	
<i>Brassica oleracea</i>										X							
<i>Eruca vesicaria</i>												X		X			
<i>Lepidium virginicum</i>							X										
<i>Matthiola incana</i>														X			
Bromeliaceae																	
<i>Hechtia bracteata</i>							X										
<i>Hechtia colossa</i>							X										
<i>Hechtia confusa</i>														X			
<i>Hechtia glomerata</i>		X				X	X			X							X
<i>Hechtia podantha</i>	X	X			*	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Hechtia pueblensis</i>							X										
<i>Hechtia sphaeroblata</i>	X	X					X			X	X						
<i>Hechtia stenopetala</i>		X															
<i>Hechtia tehuacana</i>														X			
<i>Tillandsia achyrostachys</i>							X						X				
<i>Tillandsia atroviridipetala</i>		X	X				X										

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Tillandsia bourgaei</i>																X	
<i>Tillandsia califanii</i>							X			X							
<i>Tillandsia circinnatioides</i>	X						X										
<i>Tillandsia dasyliriifolia</i>	X	X					X	X						X		X	X
<i>Tillandsia fasciculata</i>							X										
<i>Tillandsia grandis</i>													X				
<i>Tillandsia ionantha</i>													X				
<i>Tillandsia juncea</i>							X							X			
<i>Tillandsia makoyana</i>						X	*				X						
<i>Tillandsia plumosa</i>										X			X				
<i>Tillandsia pueblensis</i>							X							X	X		
<i>Tillandsia recurvata</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	X	X	*	X	X	X		X
<i>Tillandsia tehuacana</i>		X					X			X							
<i>Tillandsia usneoides</i>	X												X				
Bryaceae																	
<i>Bryum argenteum</i>														X			
<i>Bryum billarderi</i>									X					X			
Burseraceae																	
<i>Bursera aloexylon</i>		*			*	*	*										
<i>Bursera aptera</i>	X	X	X			X	X			X	X	X		X	X	X	
<i>Bursera arida</i>	X				X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Bursera aspleniifolia</i>		X	X										X			X	
<i>Bursera biflora</i>	X	X	X		X	X	*		X	X	*		X	X	X	X	
<i>Bursera bipinnata</i>							X										
<i>Bursera copallifera</i>																	X
<i>Bursera fagaroides</i>		X					X		X	X	X		X		X		
<i>Bursera galeottiana</i>						X	X		X	X			X		X	X	
<i>Bursera heteresthes</i>															X		
<i>Bursera hindsiana</i>							X										
<i>Bursera morelensis</i>	X	X					X			X			X	X	X	X	
<i>Bursera multifolia</i>									X						X		
<i>Bursera schlechtendalii</i>		X	X		X		X			X		X	X	X	X		
<i>Bursera submoniliformis</i>							X									X	
Buxaceae																	
<i>Buxus mexicana</i>									X								
Cactaceae																	
<i>Cephalocereus columna-trajani</i>	X	X			*	X	X			X	X		X	X	X	X	X
<i>Cephalocereus fulviceps</i>			X		X	*	X	X	X	X			X	X	X	X	X
<i>Cephalocereus macrocephala</i>	X	X				X	*	X		X			X	X	X	X	X
<i>Cephalocereus mezcalaensis</i>		X					*			X			X	X		X	
<i>Cephalocereus tetetzo</i>	X	X	X		X	X	*	X		X	X			X	X	X	X
<i>Coryphantha pallida</i>		*				X	X			X	X		X	X			X
<i>Coryphantha pycnantha</i>		X					X										
<i>Coryphantha reduncispina</i>		X			X		X			X							X
<i>Coryphantha retusa</i>	X	X					X	X		X							
<i>Cylindropuntia imbricata</i>	X	X					X				X			X	X		
<i>Cylindropuntia leptocaulis</i>							X							X			
<i>Cylindropuntia rosea</i>	X	X					X			X				X	X		X

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Cylindropuntia tunicata</i>		X					X			X				X			
<i>Echinocactus platyacanthus</i>	X	X	*		*	*	X	X		*	X		X	X	X	X	X
<i>Escontria chiotilla</i>	X	X					X			X	X	X			X	X	
<i>Ferocactus flavovirens</i>	X	*			X	X	*	X	X	X	X		X	X	X		X
<i>Ferocactus haematacanthus</i>									X				X				X
<i>Ferocactus recurvus</i>	X	*			X		X	X	*	X	X		X	X	X		X
<i>Ferocactus robustus</i>	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
<i>Hylocereus undatus</i>							X							X			
<i>Isolatocereus dumortieri</i>	X						*				X			X		X	
<i>Lemaireocereus hollianus</i>	X	X					X			X	X	*	X	X	X	X	X
<i>Lophocereus marginatus</i>	X	X				X	*	*		X	*	*	X	X	X	X	X
<i>Mammillaria carnea</i>	X	*			X	X	X	X		X	X			X	X		X
<i>Mammillaria flavicentra</i>																	X
<i>Mammillaria geminispina</i>		X															
<i>Mammillaria haageana</i>	X	*	X		*	X	*	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Mammillaria mystax</i>	X	X				X	X			X	X				X		X
<i>Mammillaria napina</i>		*				X		X	X								X
<i>Mammillaria pectinifera</i>						X				X							
<i>Mammillaria sphacelata</i>	X	X			*	X	*	X	X	*	X	*	X	X	X	X	X
<i>Myrtillocactus geometrizans</i>	X	*	X		X		*	*		*	*	*	X	X	X	X	X
<i>Myrtillocactus schenckii</i>		X				X	X		X	X			X				X
<i>Opuntia azurea</i>		X															
<i>Opuntia cochenillifera</i>							X							X			
<i>Opuntia decumbens</i>	X	X					X				X			X	X		X
<i>Opuntia depressa</i>	X	X					X	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Opuntia ficus-indica</i>							X							X			
<i>Opuntia huajuapensis</i>								X		X		X					
<i>Opuntia hyptiacantha</i>									X	X				X			
<i>Opuntia lasiacantha</i>													X	X			
<i>Opuntia microdasys</i>										X							
<i>Opuntia parviclada</i>							X		X								X
<i>Opuntia pilifera</i>	X	*			X	X	*	X	X	*	*	*	X	X	X	X	X
<i>Opuntia pubescens</i>	X	X					X	X		X	X	X	X	X		X	X
<i>Opuntia streptacantha</i>	X													X	X		
<i>Opuntia tehuacana</i>														X			
<i>Opuntia tomentosa</i>							X							X	X		
<i>Opuntia velutina</i>														X	X	X	
<i>Pachycereus grandis</i>													X				
<i>Pachycereus weberi</i>											X						
<i>Peniocereus viperinus</i>	X			X			X		X	X	X	*		X	X		
<i>Pereskiopsis oaxacana</i>												*					
<i>Pilosocereus chrysacanthus</i>	X	X					*	*		*	X			X	X		X
<i>Polaskia chende</i>	X							*		X				X	X		
<i>Polaskia chichipe</i>	X		X				X	*	X	*	X		X	X			X
<i>Stenocactus crispatus</i>							X			X							
<i>Stenocereus griseus</i>																X	
<i>Stenocereus pruinosus</i>	X	X					X	X		X	*	*		X	X	X	
<i>Stenocereus stellatus</i>	X	X					X	*		*	*			X	X	X	

Campanulaceae

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Lobelia laxiflora</i>																X	X
Cannabaceae																	
<i>Celtis caudata</i>									X							X	
<i>Celtis pallida</i>	X	X					*	*		X		*	X	X	X		X
Cannaceae																	
<i>Canna indica</i>							X										
Capparaceae																	
<i>Morisonia incana</i>						X	X								X		
Caprifoliaceae																	
<i>Valeriana calcicola</i>																	X
<i>Valeriana ceratophylla</i>						X			X					X			
<i>Valeriana laciniosa</i>																X	
<i>Valeriana palmeri</i>																	X
Caryophyllaceae																	
<i>Dianthus caryophyllus</i>							X										
<i>Silene laciniata</i>									X								
Celastraceae																	
<i>Acanthothamnus aphyllus</i>		X				X	X			X				X			
<i>Maytenus phyllanthoides</i>				X		X			X			*		X	X		
<i>Schaefferia pilosa</i>	X																X
<i>Schaefferia stenophylla</i>	X				X	X		*	X				X	X	X	X	X
<i>Wimmeria microphylla</i>	X					X		X	X				X		X	X	
<i>Wimmeria persicifolia</i>									X								
<i>Wimmeria serrulata</i>							X										
Cleomaceae																	
<i>Cleome uniglandulosa</i>												X					
<i>Cleome uniglandulosa</i>						X			X								
<i>Cleome viscosa</i>					X										X		
Commelinaceae																	
<i>Callisia navicularis</i>				X			X		X				X		X		
<i>Commelina diffusa</i>							X										
<i>Commelina erecta</i>											X						
<i>Commelina tuberosa</i>	X																
<i>Gibasis consobrina</i>			X			X		X	X					X			
<i>Thyrsanthemum floribundum</i>			X		X	X		X	X					X	X		
<i>Tradescantia brachyphylla</i>									X								
<i>Tradescantia crassifolia</i>				X		X	X		X					X		X	
<i>Tradescantia monosperma</i>					X	X			X							X	
<i>Tradescantia zebrina</i>						X											
Convolvulaceae																	
<i>Convolvulus nodiflorus</i>	X	X								X				X			
<i>Cuscuta chinensis</i>							X										
<i>Cuscuta corymbosa</i>												X			X		
<i>Cuscuta potosina</i>										X							
<i>Evolvulus alsinoides</i>		X								X					X		
<i>Evolvulus sericeus</i>		X			X					X			X				
<i>Ipomoea arborescens</i>	X	*			*	*	*	*	*	*	*	X	X	X		X	X
<i>Ipomoea conzattii</i>	X	X	X			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Ipomoea murucoides</i>	X									X				X	X		X

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Ipomoea orizabensis</i>		X												X			
<i>Ipomoea pauciflora</i>		X			X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X
<i>Ipomoea populina</i>				X	X												X
<i>Ipomoea purpurea</i>				X	X					X				X			
<i>Ipomoea schaffneri</i>					X												
<i>Ipomoea ternifolia</i>		X					X			X				X			
<i>Ipomoea wolcottiana</i>												X		X			
<i>Jacquemontia mexicana</i>										X							
<i>Jacquemontia smithii</i>		X			X		X					X		X	X		
<i>Merremia quinquefolia</i>					X												
Crassulaceae																	
<i>Echeveria coccinea</i>																	X
<i>Echeveria gibbiflora</i>														X	X		
<i>Echeveria gigantea</i>		X					X										
<i>Echeveria heterosepala</i>				X													
<i>Echeveria nodulosa</i>										X				X			
<i>Echeveria pallida</i>														X			
<i>Echeveria peacockii</i>						X								X			
<i>Echeveria setosa</i>		X						X	X				X				
<i>Echeveria spectabilis</i>				X										X		X	
<i>Kalanchoe blossfeldiana</i>														X			
<i>Kalanchoe luciae luciae</i>														X			
<i>Kalanchoe mortagei</i>														X			
<i>Sedum alamosanum</i>			X														
<i>Sedum allantoides</i>		X	X				X			X	X		X	X	X		
<i>Sedum dendroideum</i>							X										
<i>Sedum liebmannianum</i>				X													
<i>Sedum morganianum</i>														X			
<i>Sedum stahlia</i>				X					X								
<i>Thompsonella minutiflora</i>		X					X	X						X			
<i>Villadia albiflora</i>			X		X					X			X				
<i>Villadia elongata</i>													X				
<i>Villadia ramosissima</i>										X							
Cucurbitaceae																	
<i>Apodanthera aspera</i>														X	X		
<i>Cucurbita moschata</i>										X							
<i>Cucurbita pedatifolia</i>				X													
<i>Cucurbita pepo</i>										X							
<i>Cyclanthera dissecta</i>																	X
<i>Doyerea emetocathartica</i>														X			
<i>Echinopepon coulteri</i>													X				
<i>Echinopepon pubescens</i>					X								X	X		X	
<i>Echinopepon racemosus</i>										X			X				
<i>Schizocarpum filiforme</i>										X							
Cupressaceae																	
<i>Juniperus deppeana</i>													X				
<i>Juniperus flaccida</i>																X	
<i>Taxodium distichum</i>																X	
Cyperaceae																	

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Cyperus laevigatus</i>							X										
<i>Eleocharis geniculata</i>							X							X			
Ephedraceae																	
<i>Ephedra compacta</i>							X		X				X	X	X		
Ericaceae																	
<i>Arbutus xalapensis</i>														X			
<i>Comarostaphylis polifolia</i>				X					X				*	X			
<i>Gaultheria acuminata</i>		X															
Erpodiaceae																	
<i>Erpodium pringlei</i>									X								
Euphorbiaceae																	
<i>Acalypha botteriana</i>							X										
<i>Acalypha brevicaulis</i>										X							
<i>Acalypha monostachya</i>							X	X	X			X		X			
<i>Acalypha subviscida</i>										X							
<i>Bernardia mexicana</i>				X													X
<i>Bernardia myricifolia</i>										X							
<i>Cnidoscolus rostratus</i>		X							X				X				
<i>Cnidoscolus tehuacanensis</i>	X	*	X	X	X	X	*	X	*	*	X	*	X	X	X	X	X
<i>Croton ciliatoglandulifer</i>	X	X	X	X	X	X	*	X	X	*	X	X	X	X	X	X	X
<i>Croton draco</i>							X										
<i>Croton hypoleucus</i>				X			X	X					X				
<i>Croton mazapensis</i>							X										
<i>Croton sonorae</i>							X								X		
<i>Ditaxis guatemalensis</i>		X					X	X	*					X	X		
<i>Euphorbia adiantoides</i>		X															
<i>Euphorbia antisiphilitica</i>	X	X	X		*	X	X	X		X	X		X			X	
<i>Euphorbia anychioides</i>		X															
<i>Euphorbia aphylla</i>				*													
<i>Euphorbia berteriana</i>						X	X						X				X
<i>Euphorbia calcarata</i>							X								X		
<i>Euphorbia calyculata</i>									X								X
<i>Euphorbia colletioides</i>							X		X					X			
<i>Euphorbia cumbrae</i>	X	X					X				X	X		X			
<i>Euphorbia cyathophora</i>		X								X		X					
<i>Euphorbia cymbifera</i>	X	X			X	X		*	*			X		X	X		X
<i>Euphorbia dentata</i>																	X
<i>Euphorbia dioscoreoides</i>										X							
<i>Euphorbia graminea</i>							X										
<i>Euphorbia heterophylla</i>		X															
<i>Euphorbia hirta</i>							X										
<i>Euphorbia jaliscensis</i>							X						X				
<i>Euphorbia lacera</i>		X															
<i>Euphorbia macropus</i>																	X
<i>Euphorbia mendezii</i>							X						X				
<i>Euphorbia oaxacana</i>							X										
<i>Euphorbia ocymoidea</i>										X							
<i>Euphorbia prostrata</i>							X										
<i>Euphorbia rossiana</i>	X	X				X	X			X							X

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Euphorbia schiedeana</i>										X			X	X			
<i>Euphorbia tithymaloides</i>		X					X			X			X	X			
<i>Euphorbia tricolor</i>				X			X			X			X	X		X	
<i>Euphorbia velleriflora</i>						X											
<i>Euphorbia villifera</i>							X										X
<i>Jatropha dioica</i>				X			X			X			X				
<i>Jatropha neopauciflora</i>	X	*					X			X	X			X		X	X
<i>Manihot pauciflora</i>		X				X	X		X	X		X		X			X
<i>Ricinus communis</i>							X							X	X		
<i>Sebastiania bilocularis</i>				X			X						X				
<i>Stillingia sanguinolenta</i>						X	X										
<i>Tragia nepetifolia</i>			X			X	X		X	X	X		X				
Fabaceae																	
<i>Acaciella angustissima</i>		X				X	X		X					X			
<i>Aeschynomene compacta</i>	X	X				X	X		X	*	X		X	X	X	X	X
<i>Aeschynomene fascicularis</i>		X					X										
<i>Aeschynomene purpusii</i>							X			X		X		X		X	
<i>Astragalus strigosus</i>													X				X
<i>Bauhinia deserti</i>				X			X			X			X	X			
<i>Bauhinia dipetala</i>									X								
<i>Brongniartia foliolosa</i>						X			X	*			X	X	X		X
<i>Brongniartia oligosperma</i>	X	X			X	X	X		X	X				X	X	X	
<i>Brongniartia vicioides</i>										X			X				
<i>Caesalpinia melanadenia</i>	X	*			*	*	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Caesalpinia pulcherrima</i>														X			
<i>Calia secundiflora</i>				X		X			X								X
<i>Calliandra eriophylla</i>						*	*			*			X				
<i>Calliandra grandiflora</i>						X										X	
<i>Calliandra hirsuta</i>										X			X				
<i>Calliandra houstoniana</i>														X			
<i>Calliandropsis nervosus</i>	X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X		X	X
<i>Chamaecrista greggii</i>		X					X			X	X		X	X	X		
<i>Chamaecrista serpens</i>		X															
<i>Cojoba arborea</i>																	X
<i>Cologania broussonetii</i>													X				
<i>Cologania grandiflora</i>				X		X											
<i>Conzattia multiflora</i>	X	X					X		X	X	X		X	X			X
<i>Coursetia caribaea</i>							X			X			X			X	X
<i>Crotalaria incana</i>														X			
<i>Crotalaria longirostrata</i>													X				X
<i>Crotalaria micans</i>														X			
<i>Crotalaria mollicula</i>													X				
<i>Crotalaria pumila</i>																X	
<i>Dalea bicolor</i>				X		X	X	X	X	X			X	X		X	X
<i>Dalea botterii</i>																	X
<i>Dalea caeciliae</i>									X					X			
<i>Dalea carthagenensis</i>		X					X			X	X	X		X		X	
<i>Dalea dorycnioides</i>													X				
<i>Dalea filiciformis</i>							X			X				X			

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Dalea foliolosa</i>				X		X			X				X			X	
<i>Dalea greggii</i>														X			
<i>Dalea leucosericea</i>													X				
<i>Dalea luisana</i>										X							
<i>Dalea lutea</i>				X		X							X				
<i>Dalea melantha</i>						X			X							X	X
<i>Dalea tomentosa</i>									X				X				
<i>Dalea zimapanica</i>													X	X			
<i>Desmodium grahamii</i>																	X
<i>Desmodium neomexicanum</i>				X													X
<i>Desmodium orbiculare</i>						X											X
<i>Desmodium pringlei</i>				X													
<i>Desmodium subsessile</i>				X													X
<i>Diphysa sennoides</i>						X											
<i>Diphysa villosa</i>																X	
<i>Erythrina breviflora</i>		X		X						X							
<i>Erythrina oxacana</i>								X	X								
<i>Erythroxyllum rotundifolium</i>		X					X			X				X		X	
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	X					X	*		X	X	X		X	X		X	
<i>Eysenhardtia punctata</i>					X												X
<i>Eysenhardtia texana</i>						X	X										
<i>Galactia brachystachys</i>													X	X			X
<i>Harpalyce formosa</i>						X											
<i>Havardia acatlensis</i>							X										
<i>Hesperothamnus pentaphyllus</i>				X					X							X	
<i>Hoffmannseggia humilis</i>									X				X				
<i>Indigofera constricta</i>																	X
<i>Indigofera conzattii</i>										X			X	X		X	
<i>Indigofera pueblensis</i>										X							
<i>Indigofera suffruticosa</i>										X							X
<i>Leucaena confertiflora</i>		X		X			X										
<i>Leucaena diversifolia</i>										X							
<i>Leucaena esculenta</i>		X					X										
<i>Leucaena leucocephala</i>							X		X			X		X	X		
<i>Leucaena pallida</i>						X	X			X							
<i>Leucaena trichandra</i>				X													X
<i>Lonchocarpus obovatus</i>	X									X				X			
<i>Lysiloma divaricatum</i>							*	X	X	X	X	X		X		X	X
<i>Macroptilium atropurpureum</i>							X			X				X	X	X	
<i>Mariosousa acatlensis</i>							X										X
<i>Mariosousa coulteri</i>		X				*					*					X	
<i>Mariosousa sericea</i>						X			X	X			X	X			X
<i>Mariosousa compacta</i>	X					X	X							X	X		
<i>Melilotus albus</i>													X				
<i>Mimosa aculeaticarpa</i>		X					X	X		X							
<i>Mimosa adenantheroides</i>															X		
<i>Mimosa benthamii</i>		X							X				X				
<i>Mimosa calcicola</i>							X						X	X	X		
<i>Mimosa guatemalensis</i>											X						

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Mimosa lacerata</i>		X				X	X	*	X	*	*			X			
<i>Mimosa lactiflua</i>										X							X
<i>Mimosa luisana</i>	X	*			*	*	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X
<i>Mimosa polyancistra</i>							X										
<i>Mimosa polyantha</i>							X	X			*				X	X	
<i>Mimosa pueblensis</i>										X				X			
<i>Mimosa purpusii</i>														X			
<i>Nissolia fruticosa</i>														X			
<i>Nissolia leiogyne</i>										X			X	X			
<i>Nissolia microptera</i>	X	X				X	X		X	X				X			
<i>Painteria leptophylla</i>													X				
<i>Parkinsonia florida</i>		X															
<i>Parkinsonia praecox</i>	X	*			X	*	*		*	*	X	X	X	X	X	X	X
<i>Pediomelum palmeri</i>													X				
<i>Phaseolus coccineus</i>		X				X											
<i>Phaseolus leptostachyus</i>	X					X							X				
<i>Phaseolus microcarpus</i>		X															
<i>Phaseolus vulgaris</i>		X				X			X	X							
<i>Piscidia grandifolia</i>							X			X				X	X		
<i>Pithecellobium elachistophyllum</i>		X	*			X							X				
<i>Prosopis juliflora</i>		X															
<i>Prosopis laevigata</i>	X	X	X		X	X	*	*	X	X	*	*	X	X	X	X	X
<i>Rhynchosia discolor</i>						X											X
<i>Rhynchosia senna</i>						X											
<i>Senegalia purpusii</i>							X										
<i>Senegalia subangulata</i>	X	X				*	*	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Senna apiculata</i>		X					X							X	X		
<i>Senna arida</i>													X				
<i>Senna demissa</i>							X								X		
<i>Senna galeottiana</i>						X	X		X	X	X		X	X		X	X
<i>Senna guatemalensis</i>				X					X					X			
<i>Senna holwayana</i>		X				X		X	X	X	*			X	X	X	
<i>Senna polyantha</i>																	X
<i>Senna unijuga</i>				X			X		X				X	X			
<i>Senna wislizeni</i>	X	X					X							X			X
<i>Sophora secundiflora</i>							X			X			X				X
<i>Vachellia bilimekii</i>		X			X		X			X		X		X		X	
<i>Vachellia campechiana</i>							*			X							X
<i>Vachellia constricta</i>	X	X		X	*	*	X	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Vachellia farnesiana</i>		X					X			X		X		X	X		
<i>Vachellia macracantha</i>	X	X		X	X	X	X			X			X				X
<i>Vigna luteola</i>															X		
<i>Zapoteca formosa</i>	X					X	X		X	X				X		X	
<i>Zapoteca media</i>									X								
Fabroniaceae																	
<i>Fabronia ciliaris</i>						X			X					X		X	
Fagaceae																	
<i>Quercus acutifolia</i>				X													

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Quercus deserticola</i>						X			X								
<i>Quercus glaucooides</i>							X		X						X		
<i>Quercus greggii</i>													X				
<i>Quercus magnoliifolia</i>	*												X				
<i>Quercus repanda</i>							X										
<i>Quercus sebifera</i>							X		X	X			*	X		X	X
<i>Quercus x dysophylla</i>																	X
Fissidentaceae																	
<i>Fissidens repandus</i>														X			
Fouquieriaceae																	
<i>Fouquieria formosa</i>		*			*	*	*	X		*	*		X	X	X	X	
Garryaceae																	
<i>Garrya laurifolia</i>									X								
<i>Garrya ovata</i>				X					X					X			
Gentianaceae																	
<i>Eustoma exaltatum</i>							X										
Geraniaceae																	
<i>Erodium cicutarium</i>													X				
<i>Pelargonium x hybridum</i>														X			
Gesneriaceae																	
<i>Columnnea schiedeana</i>															X		
Hernandiaceae																	
<i>Gyrocarpus americanus</i>					X												
<i>Gyrocarpus mocinoi</i>	X										*				X		
Iridaceae																	
<i>Iris x germanica</i>														X			
<i>Sisyrinchium angustissimum</i>																X	
<i>Sisyrinchium bracteatum</i>										X							
Iteaceae																	
<i>Pterostemon rotundifolius</i>			X	X		X	X		X	X			X				X
Juncaceae																	
<i>Juncus bufonius</i>													X				
Krameriaceae																	
<i>Krameria cytisoides</i>	X	X				X	X	X	X	X			X	X	X	X	
<i>Krameria pauciflora</i>						X	X			X							
<i>Krameria prostrata</i>							X										
<i>Krameria revoluta</i>							X										
Lamiaceae																	
<i>Lepechinia mexicana</i>							X								X		
<i>Marrubium vulgare</i>													X	X			X
<i>Ocimum basilicum</i>														X			
<i>Salvia amarissima</i>		X							X								X
<i>Salvia aspera</i>		X		X			X	X	X					X		X	
<i>Salvia axillaris</i>																	X
<i>Salvia candicans</i>							X		X	X			*	X	X		X
<i>Salvia connivens</i>																X	
<i>Salvia fruticulosa</i>		X															
<i>Salvia keerlii</i>																	X
<i>Salvia lasiantha</i>						X			X				X			X	

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Salvia leptostachys</i>																	X
<i>Salvia leucantha</i>																X	
<i>Salvia lineata</i>						X										X	X
<i>Salvia melissodora</i>						X							X			X	
<i>Salvia microphylla</i>				X									X			X	X
<i>Salvia oaxacana</i>				X			X		X	X			X	X		X	X
<i>Salvia oreopola</i>		X															
<i>Salvia pannosa</i>																X	
<i>Salvia polystachya</i>									X				X				
<i>Salvia purpurea</i>													X				
<i>Salvia ramosa</i>																X	
<i>Salvia reflexa</i>		X															
<i>Salvia rubiginosa</i>		X													X		
<i>Salvia thymoides</i>						X			X	X			X		X		X
<i>Scutellaria resinosa</i>																X	
<i>Scutellaria uliginosa</i>										X							
<i>Stachys collina</i>													X				
<i>Trichostema purpusii</i>		X											X				X
Lauraceae																	
<i>Litsea glaucescens</i>				X									*				
<i>Persea americana</i>														X		X	
Lejeuneaceae																	
<i>Lejeunea calcicola</i>																X	
Lennoaceae																	
<i>Lennoa madreporoides</i>									X					X			
Lentibulariaceae																	
<i>Pinguicula moranensis</i>				X													
Liliaceae																	
<i>Calochortus barbatus</i>						X											
<i>Linum scabrellum</i>				X			X			X			X				
Lindsaeaceae																	
<i>Odontosoria schlechtendalii</i>		X															
Loasaceae																	
<i>Eucnide lobata</i>							X										
<i>Mentzelia hispida</i>		X	X		X		X			X		X	X	X	X		
Loranthaceae																	
<i>Psittacanthus auriculatus</i>		X															
<i>Psittacanthus calyculatus</i>		X					X			X	X			X			
<i>Psittacanthus mayanus</i>																X	
<i>Psittacanthus palmeri</i>										X						X	
<i>Psittacanthus schiedeanus</i>		X								X							
Lycopodiaceae																	
<i>Lycopodiella cernua</i>		X															
Lythraceae																	
<i>Cuphea aequipetala</i>				X						X				X			
<i>Cuphea cyanea</i>				X					X					X			
<i>Cuphea leptopoda</i>		X												X			
Malpighiaceae																	
<i>Bunchosia biocellata</i>														X			

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Bunchosia montana</i>							X							X			
<i>Byrsonima crassifolia</i>														X			
<i>Callicola parvifolia</i>		X								X					X		
<i>Echinopterys eglandulosa</i>		X			X	X	X			X	X	X		X	X	X	
<i>Galphimia glauca</i>		X					X			X			X	X		X	X
<i>Gaudichaudia galeottiana</i>						X								X			
<i>Gaudichaudia mucronata</i>							X								X		
<i>Lasiocarpus ferrugineus</i>										X				X			
<i>Lasiocarpus salicifolius</i>						X				X							
<i>Malpighia galeottiana</i>		X					X							X			X
<i>Malpighia glabra</i>							X										
<i>Malpighia mexicana</i>	X	X			X		X				X			X			
<i>Mascagnia parvifolia</i>		X	X		*		*		*	X	X	X		X	X	X	X
<i>Mascagnia polybotrya</i>													X				
<i>Mascagnia seleriana</i>		X					X							X	X		X
Malvaceae																	
<i>Allowissadula pringlei</i>							X			X							
<i>Allowissadula rosei</i>		X															
<i>Anoda crenatiflora</i>		X															
<i>Anoda cristata</i>		X		X	X		X					X	X	X			X
<i>Anoda thurberi</i>												X					
<i>Ayenia fruticosa</i>			X	X			X		X	X				X	X		
<i>Ayenia mexicana</i>		X				X											
<i>Ayenia microphylla</i>							X			*							
<i>Ayenia mollis</i>							X										
<i>Ayenia ovata</i>							X			X				X	X		
<i>Ayenia pilosa</i>															X		
<i>Ayenia pusilla</i>							X										
<i>Ayenia rotundifolia</i>										X							
<i>Ayenia standleyi</i>							X			X							
<i>Bastardia bivalvis</i>														X			
<i>Bastardia viscosa</i>							X							X			
<i>Ceiba aesculifolia</i>	X	*				*	*				*	X		X			
<i>Gossypium hirsutum</i>															X		
<i>Heliocarpus americanus</i>													X				
<i>Heliocarpus appendiculatus</i>								X									
<i>Heliocarpus terebinthinaceus</i>							X									X	
<i>Herissantia crispa</i>		X					X		X	X	X			X	X		
<i>Hibiscus acetosella</i>										X							
<i>Hibiscus brasiliensis</i>							X										
<i>Hibiscus coulteri</i>							X										
<i>Hibiscus elegans</i>	X					X	X			X				X	X	X	X
<i>Hibiscus longifilus</i>				X					X	X			X	X			
<i>Hibiscus phoeniceus</i>		X					X			X		X		X			
<i>Malva neglecta</i>														X			
<i>Malva parviflora</i>							X										
<i>Malvastrum americanum</i>										X					X	X	X
<i>Malvastrum bicuspidatum</i>																X	
<i>Malvastrum coromandelianum</i>													X	X			

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Melochia tomentosa</i>		X					X							X	X	X	
<i>Phymosia floribunda</i>															X		
<i>Pseudobombax ellipticum</i>							X										
<i>Rhynchosida physocalyx</i>										X							
<i>Robinsonella chiangii</i>		X														X	X
<i>Robinsonella cordata</i>																X	
<i>Sida abutilifolia</i>							X			X				X	X		
<i>Sida ciliaris</i>														X	X		
<i>Sida glabra</i>									X								
<i>Sida neomexicana</i>							X										
<i>Sida pueblensis</i>															X		
<i>Sida rhombifolia</i>													X	X			
<i>Triumfetta grandiflora</i>		X															
Marchantiaceae																	
<i>Dumortiera hirsuta</i>																	X
<i>Marchantia paleacea</i>																	X
Martyniaceae																	
<i>Proboscidea louisianica</i>							X			X				X			
<i>Proboscidea triloba</i>							X										
Melastomataceae																	
<i>Miconia trinervia</i>							X										
<i>Monochaetum floribundum</i>		X															
Melanthiaceae																	
<i>Schoenocaulon comatum</i>																X	
<i>Schoenocaulon tenuifolium</i>																X	
Monocleaceae																	
<i>Monoclea gottschei</i>																	X
Moraceae																	
<i>Ficus carica</i>														X	X		
<i>Ficus cotinifolia</i>														X			
<i>Ficus elastica</i>														X			
<i>Ficus velutina</i>																	X
Musaceae																	
<i>Musa x paradisiaca</i>														X			
Myrtaceae																	
<i>Psidium guajava</i>														X			
Nyctaginaceae																	
<i>Allionia choisyi</i>									X					X			
<i>Allionia incarnata</i>		X		X		X	X	X	X						X	X	
<i>Boerhavia anisophylla</i>		X															X
<i>Boerhavia coccinea</i>		X					X							X			X
<i>Boerhavia erecta</i>					X		X	X									
<i>Commicarpus scandens</i>							X										
<i>Cyphomeris crassifolia</i>										X							
<i>Mirabilis albida</i>							X	X									
<i>Mirabilis glabrifolia</i>							X	X									
<i>Mirabilis viscosa</i>					X					X					X		X
Olacaceae																	
<i>Ximenia americana</i>							X										

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
Oleaceae																	
<i>Forestiera angustifolia</i>							X										
<i>Forestiera rotundifolia</i>										X				X			
<i>Fraxinus purpusii</i>	X							X					X				
<i>Jasminum mesnyi</i>												X					
<i>Menodora tehuacana</i>						X	X			X							
Onagraceae																	
<i>Lopezia racemosa</i>						X								X		X	
<i>Oenothera anomala</i>	X																
<i>Oenothera suffrutescens</i>																	X
<i>Oenothera tetraptera</i>						X											
Opiliaceae																	
<i>Agonandra obtusifolia</i>							X							X			
Orchidaceae																	
<i>Barkeria lindleyana</i>			X							X							
<i>Bletia parkinsonii</i>							X										
<i>Cyrtopodium macrobulbon</i>																X	
<i>Dichromanthus cinnabarinus</i>			X	X						X							
<i>Elleanthus capitatus</i>																X	
<i>Epidendrum ramosum</i>																X	
<i>Laelia albida</i>						X	X					X	X				
<i>Mesadenus polyanthus</i>							X										
<i>Nidema boothii</i>							X										
Orobanchaceae																	
<i>Castilleja auriculata</i>										X							X
<i>Castilleja lithospermoides</i>	X																
<i>Castilleja tenuiflora</i>				X		X	X		X	X			X			X	
<i>Lamourouxia dasyantha</i>		X				X	X		X				X	X		X	X
<i>Lamourouxia lanceolata</i>										X							
<i>Lamourouxia multifida</i>							X							X			
<i>Lamourouxia nelsonii</i>				X			X										X
<i>Lamourouxia rhinanthifolia</i>									X								
<i>Lamourouxia viscosa</i>										X						X	
<i>Lamourouxia xalapensis</i>							X										
<i>Orobanche ludoviciana</i>	X						X										
<i>Orobanche ludovicianum</i>							X										
Orthotrichaceae																	
<i>Orthotrichum diaphanum</i>										X							
Oxalidaceae																	
<i>Oxalis divergens</i>				X						X							
<i>Oxalis frutescens</i>		X					X			X				X			
<i>Oxalis neaei</i>					X		X	X	X	X							
<i>Oxalis nelsonii</i>									X								
Papaveraceae																	
<i>Argemone mexicana</i>							X		X			X		X		X	X
<i>Argemone ochroleuca</i>												X					
<i>Argemone platyceras</i>													X				
Passifloraceae																	
<i>Passiflora foetida</i>						X	X		X				X		X		

Espezie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Passiflora suberosa</i>		X			X		X		X	X	X				X		
<i>Turnera diffusa</i>	X	X	X	X		X	X		X	*				X			
Petiveriaceae																	
<i>Rivina humilis</i>							X					X		X			
Phrymaceae																	
<i>Hemichaena levigata</i>						X	X		X					X		X	X
Phyllanthaceae																	
<i>Phyllanthus subcuneatus</i>				X			X		X				X				
Pinaceae																	
<i>Pinus teocote</i>															X		
Piperaceae																	
<i>Piper auritum</i>														X			
Plantaginaceae																	
<i>Bacopa monnieri</i>		X									X				X		
<i>Lophospermum erubescens</i>							X		X								
<i>Lophospermum purpusii</i>							X									X	
<i>Maurandella antirrhiniflora</i>														X			
<i>Maurandella barclayana</i>							X										X
<i>Maurandella scandens</i>													X				
<i>Penstemon miniatus</i>																	X
<i>Russelia obtusata</i>				X			X		X	X			X	X	X		X
<i>Russelia verticillata</i>		X															
Plumbaginaceae																	
<i>Plumbago pulchella</i>									X					X			
<i>Plumbago scandens</i>									X	X							
Poaceae																	
<i>Andropogon glomeratus</i>										X							
<i>Aristida adscensionis</i>							X							X		X	
<i>Aristida glauca</i>							X		X	X		X					
<i>Aristida laxa</i>							X			X		X					
<i>Aristida purpurea</i>							X			X		X			X		
<i>Arundo donax</i>												X					
<i>Bothriochloa barbinodis</i>		X				X	X					X		X			
<i>Bothriochloa laguroides</i>						X											X
<i>Bouteloua barbata</i>							X							X			
<i>Bouteloua chondrosioides</i>															X		
<i>Bouteloua curtipendula</i>		X			X		X			X				X	X	X	
<i>Bouteloua dimorpha</i>							X										
<i>Bouteloua distans</i>							X			X							
<i>Bouteloua diversispicula</i>							X							X			
<i>Bouteloua erecta</i>										X							
<i>Bouteloua media</i>							X					X		X			
<i>Bouteloua polymorpha</i>							X										
<i>Bouteloua reederorum</i>							X										
<i>Bouteloua repens</i>																	X
<i>Bouteloua simplex</i>													X				
<i>Bouteloua triaena</i>						X				X				X	X	X	X
<i>Bouteloua varia</i>										X							
<i>Capsicum annuum</i>							X										

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Cenchrus echinatus</i>														X			
<i>Cenchrus myosuroides</i>							*										
<i>Chaetium bromoides</i>								X									
<i>Chloris barbata</i>							X										
<i>Chloris radiata</i>							X										
<i>Chloris rufescens</i>												X		X			
<i>Chloris submutica</i>														X			
<i>Cynodon dactylon</i>														X			
<i>Echinochloa crus-galli</i>														X			
<i>Enneapogon desvauxii</i>							X							X	X		
<i>Eragrostis atrovirens</i>												X		X			
<i>Eragrostis cilianensis</i>							X					X		X			
<i>Eragrostis mexicana</i>						X	X										
<i>Eragrostis pectinacea</i>														X			
<i>Eragrostis pilosa</i>						X											X
<i>Eragrostis polytricha</i>						X											
<i>Erioneuron avenaceum</i>									X	X				X			
<i>Heteropogon contortus</i>		X				X	X					X		X			
<i>Hopia obtusa</i>										X							
<i>Lasiacis grisebachii</i>						X	X							X			
<i>Lasiacis nigra</i>							X	X									
<i>Leptochloa pluriflora</i>							X					X		X			
<i>Melinis repens</i>	X	X			X		X	X	X	X				X		X	
<i>Metcalfia mexicana</i>				X				X	X				X				
<i>Muhlenbergia distans</i>													X				
<i>Muhlenbergia implicata</i>						X							X				X
<i>Muhlenbergia longiligula</i>													X				
<i>Muhlenbergia phleoides</i>							X										
<i>Muhlenbergia pubescens</i>						X											X
<i>Muhlenbergia rigida</i>						X							X				X
<i>Muhlenbergia robusta</i>													X				
<i>Muhlenbergia tenella</i>													X				
<i>Muhlenbergia versicolor</i>	X																
<i>Panicum hallii</i>							X			X					X		
<i>Panicum obtusum</i>										X					X		
<i>Phragmites australis</i>															X		
<i>Polypogon viridis</i>																	X
<i>Saccharum officinarum</i>														X			
<i>Setaria adhaerens</i>												X		X			
<i>Setaria grisebachii</i>						X	X										X
<i>Setaria macrostachya</i>										X							
<i>Setaria parviflora</i>						X							X				X
<i>Setariopsis auriculata</i>										X							
<i>Sporobolus airoides</i>												*					
<i>Sporobolus macrospermus</i>		X															
<i>Sporobolus pyramidalis</i>		X				X											
<i>Sporobolus pyramidatus</i>		X					X			X				X			
<i>Sporobolus wrightii</i>										X							
<i>Stipa constricta</i>						X											X

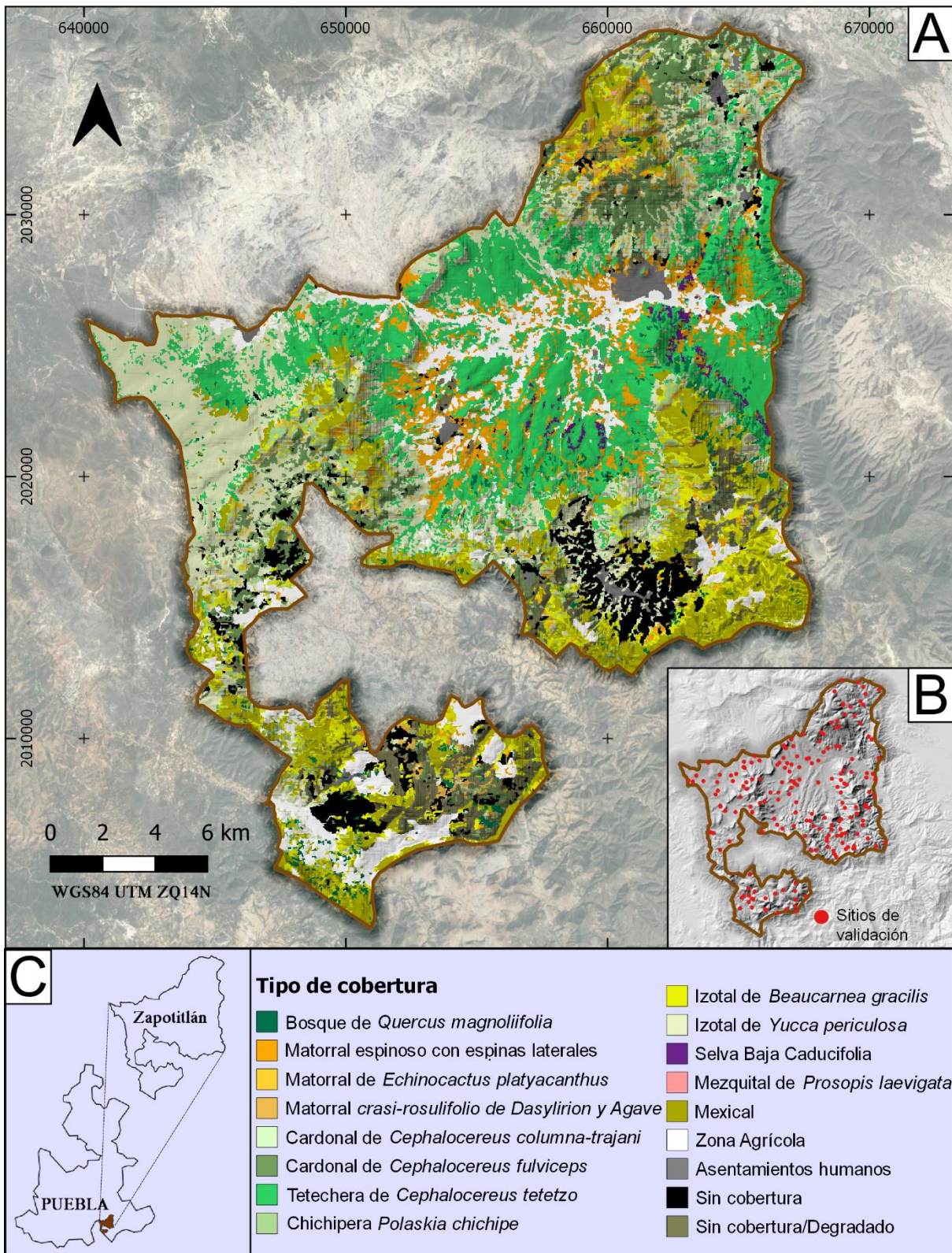
Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Stipa eminens</i>						X							X				
<i>Tragus berteronianus</i>										X							
<i>Zea mays</i>		X					X			X		X		X		X	
Polemoniaceae																	
<i>Loeselia caerulea</i>		X				X	X		X	*	X	X	X	X			
<i>Loeselia glandulosa</i>						X									X	X	
<i>Loeselia purpusii</i>		X											X			X	
Polygalaceae																	
<i>Polygala annectens</i>														X			
<i>Polygala compacta</i>														X			
<i>Polygala cuspidulata</i>						X			X								
<i>Polygala dolichocarpa</i>																X	
<i>Polygala obscura</i>		X		X					X	X			X				
<i>Polygala oedophylla</i>																X	
<i>Polygala purpusii</i>							X						X				
Polypodiaceae																	
<i>Campyloneurum crassifolium</i>		X															
<i>Nephrolepis pectinata</i>																X	
<i>Phlebodium areolatum</i>		X														X	
<i>Polypodium echinolepis</i>		X															
<i>Polypodium longepinnulatum</i>		X															
<i>Polypodium plesiosorum</i>		X															
Portulacaceae																	
<i>Portulaca mexicana</i>		X												X			
<i>Portulaca oleracea</i>														X			
<i>Portulaca pilosa</i>							X			X				X		X	
<i>Zannichellia palustris</i>							X								X		
Pottiaceae																	
<i>Aloina hamulus</i>									X	X				X			
<i>Barbula orizabensis</i>										X							
<i>Barbula spiralis</i>						X				X				X			
<i>Crossidium crassinervium</i>									X								
<i>Didymodon australasiae</i>														X			
<i>Didymodon revolutus</i>									X								
<i>Didymodon rigidulus</i>		X				X	X		X	X			X	X		X	
<i>Didymodon vinealis</i>									X								
<i>Globulinella globifera</i>									X	X				X			
<i>Molendoa sendtneriana</i>						X	X		X	X				X			
<i>Neohyophila sprengelii</i>										X							
<i>Pseudocrossidium aureum</i>							X			X							
<i>Pseudocrossidium crinitum</i>																	X
<i>Pseudocrossidium replicatum</i>														X		X	
<i>Syntrichia fragilis</i>									X								
<i>Tortella humilis</i>									X								
<i>Tortula aurea</i>														X			
<i>Tortula obtusissima</i>						X			X					X			
<i>Trichostomum brachydontium</i>							X		X	X			X	X			
<i>Trichostomum crispulum</i>							X		X	X				X			
<i>Weissia controversa</i>						X			X	X							

Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Weissia jamaicensis</i>										X			X		X		X
Primulaceae																	
<i>Lysimachia arvensis</i>													X				X
<i>Samolus ebracteatus</i>						X											
Pteridaceae																	
<i>Hemionitis aschenborniana</i>					X												
<i>Hemionitis candida</i>															X		
<i>Clematis dioica</i>										X							
Resedaceae																	
<i>Forchhammeria macrocarpa</i>							X							X			
<i>Reseda luteola</i>	X																
Rhamnaceae																	
<i>Adolphia infesta</i>		X															
<i>Ceanothus greggii</i>				X					X				X				X
<i>Colubrina macrocarpa</i>									X								X
<i>Colubrina triflora</i>		X					X	X		X							
<i>Condalia fasciculata</i>									*					X			
<i>Karwinskia humboldtiana</i>		*				X	*	X	*	X				X	X		X
<i>Karwinskia mollis</i>						X	X			X	X				X		
<i>Sarcomphalus amole</i>	X	X					X							X			
<i>Sarcomphalus mexicana</i>	X						X			X	X			X	X		
<i>Sarcomphalus obtusifolia</i>			X											X			
<i>Sarcomphalus pedunculata</i>			X							X	X						
Rhizoganiaceae																	
<i>Pyrrhobryum spiniforme</i>																X	
Rosaceae																	
<i>Cercocarpus fothergilloides</i>				X					X				*	X			X
<i>Cercocarpus pringlei</i>																	X
<i>Lindleya mespiloides</i>			X				X							X			
<i>Malacomeles denticulata</i>									X	X			X	X			
<i>Prunus serotina</i>														X			X
<i>Vauquelinia australis</i>				X	X	X	X		X				X	X	X		X
<i>Xerospiraea hartwegiana</i>			X						X					X			
Rubiaceae																	
<i>Bouvardia chrysantha</i>									X							X	X
<i>Bouvardia erecta</i>				X	X	X	X	X	*					X	X		
<i>Bouvardia longiflora</i>	X		X	X	X	X	X	X	X				X			X	X
<i>Bouvardia multiflora</i>																	X
<i>Bouvardia ternifolia</i>					X		X										X
<i>Bouvardia viminalis</i>			X						X					X		X	X
<i>Coutaportla ghiesbreghtiana</i>				X			X										
<i>Galium fuscum</i>										X			X	X			X
<i>Galium microphyllum</i>													X				
<i>Hintonia latiflora</i>	X				X	X	X	X	X	X				X			
<i>Hintonia standleyana</i>	X																
<i>Randia capitata</i>			X	X	X	X	X	X	X	X			X	X			
<i>Randia laetevirens</i>										X							
<i>Randia thurberi</i>																X	
<i>Relbunium laevigatum</i>																	X

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Spermacoce verticillata</i>				X													
Rutaceae																	
<i>Casimiroa calderoniae</i>							X		X	X							
<i>Helietta lucida</i>														X	X		
<i>Helietta parvifolia</i>														X			
<i>Megastigma galeottii</i>							X			X				X			
<i>Ptelea trifoliata</i>										X			X				X
<i>Zanthoxylum affine</i>													X				
<i>Zanthoxylum ciliatum</i>							X									X	
<i>Zanthoxylum liebmannianum</i>		X				X	X		*	*		X		X	X		
<i>Zanthoxylum limoncello</i>										X					X		
Salicaceae																	
<i>Neopringlea integrifolia</i>										*							
<i>Neopringlea viscosa</i>						X	X		X	X				X			
Santalaceae																	
<i>Phoradendron bolleanum</i>							X										
<i>Phoradendron brachystachyum</i>														X			
<i>Phoradendron californicum</i>	X	X					X			X		*		X			
<i>Phoradendron carneum</i>		X								X			X				X
<i>Phoradendron forestierae</i>								X									X
<i>Phoradendron lanatum</i>																	X
<i>Phoradendron quadrangulare</i>							X										
<i>Phoradendron reichenbachianum</i>		X											X				
<i>Phoradendron robinsonii</i>														X			
Sapindaceae																	
<i>Cardiospermum corindum</i>							X										
<i>Cardiospermum halicacabum</i>	X	X			X		X			X		X	X	X	X	X	
<i>Dodonaea viscosa</i>			X	X			X		X				X				X
<i>Serjania flaviflora</i>																X	X
<i>Serjania racemosa</i>									X							X	
<i>Thouinia villosa</i>									X								
Sapotaceae																	
<i>Manilkara zapota</i>						X											
<i>Sideroxylon salicifolium</i>							X						X				X
Schoepfiaceae																	
<i>Schoepfia schreberi</i>												X		X			
Scrophulariaceae																	
<i>Buddleja crotonoides</i>													X				
<i>Leucophyllum pringlei</i>							X			X				X		X	X
Selaginellaceae																	
<i>Selaginella lepidophylla</i>		X					X							X	X		
<i>Selaginella pallescens</i>							X										
Setchellanthaceae																	
<i>Setchellanthus caeruleus</i>							X										
Simaroubaceae																	
<i>Castela erecta</i>	X	*			X	X	*			X	X	X	X	X	X	X	X
Smilacaceae																	

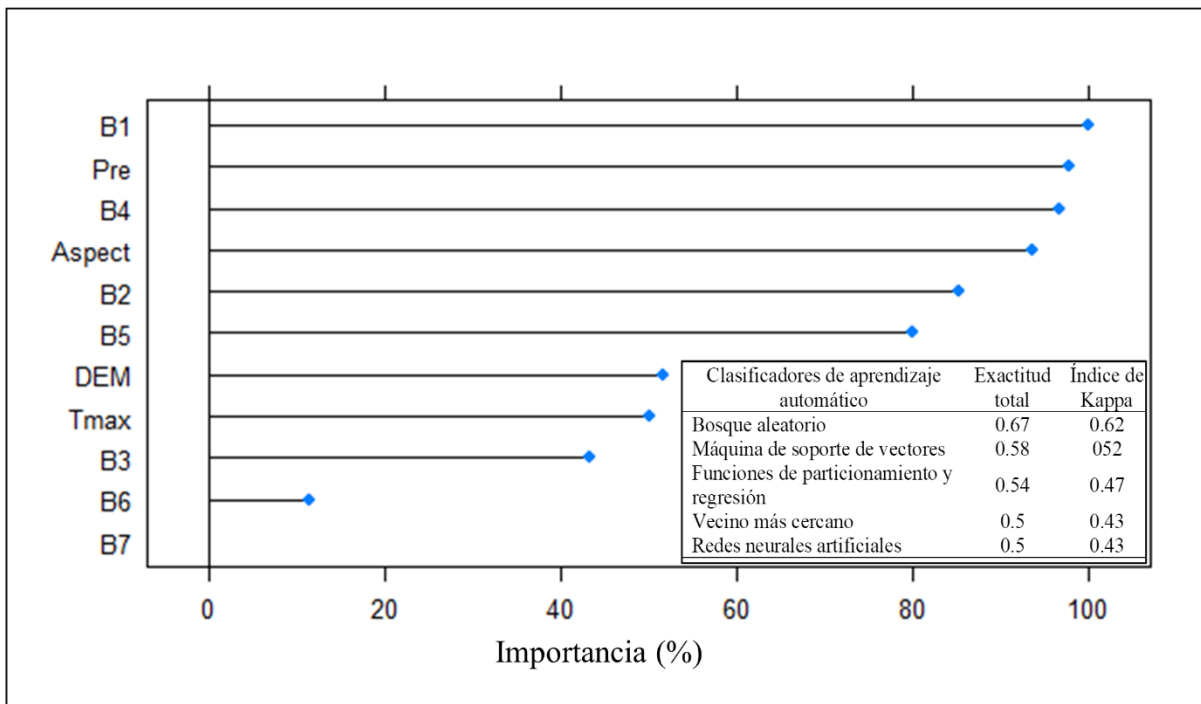
Especie/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Smilax mollis</i>																X	
<i>Smilax moranensis</i>																	X
Solanaceae																	
<i>Calibrachoa parviflora</i>							X			X							
<i>Cestrum fulvescens</i>																	X
<i>Cestrum tomentosum</i>																	X
<i>Datura innoxia</i>		X				X	X							X		X	
<i>Datura pruinosa</i>							X							X			
<i>Datura stramonium</i>		X				X						X	X				
<i>Grabowskia boerhaaviifolia</i>	X	X	X		X	X	X									X	X
<i>Jaltomata procumbens</i>		X															
<i>Lycianthes acapulcensis</i>						X											
<i>Lycianthes ciliolata</i>							X										
<i>Lycianthes moziniana</i>															X		
<i>Lycianthes peduncularis</i>										X							
<i>Nicotiana glauca</i>	X	X				X	X			X		X		X		X	
<i>Nicotiana obtusifolia</i>								X	X								
<i>Nicotiana plumbaginifolia</i>										X							
<i>Nicotiana trigonophylla</i>										X			X	X			
<i>Physalis nicandroides</i>														X			
<i>Physalis patula</i>							X										
<i>Physalis philadelphica</i>							X					X	X	X			
<i>Physalis solanacea</i>				X												X	
<i>Solanum americanum</i>							X			X			X	X			
<i>Solanum cardiophyllum</i>													X				
<i>Solanum douglasii</i>						X											
<i>Solanum dulcamaroides</i>						X										X	
<i>Solanum grayi</i>		X												X			
<i>Solanum houstonii</i>							X										
<i>Solanum lanceolatum</i>				X				X	X								X
<i>Solanum lycopersicum</i>							X										
<i>Solanum nigrum</i>													X				
<i>Solanum rostratum</i>		X					X		X			X		X	X		
<i>Solanum rostratum</i>	X																
<i>Solanum torvum</i>							X				X						
<i>Solanum tribulosum</i>																X	X
<i>Solanum tridynamum</i>		X			X	*	X		X	X	*	X		X	X		X
Splachnobryaceae																	
<i>Splachnobryum obtusum</i>			X														
Talinaceae																	
<i>Talinum aurantiacus</i>										X				X			
<i>Talinum lineare</i>									X								
<i>Talinum paniculatum</i>							X			X		X		X			
Thuidiaceae																	
<i>Thuidium robustum</i>											X						
Urticaceae																	
<i>Pilea microphylla</i>				X					X				X				
Verbenaceae																	
<i>Aloysia gratissima</i>							X										

Espece/Clase de CVUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\frac{1}{7}$
<i>Bouchea prismatica</i>							X										
<i>Citharexylum brachyanthum</i>							X										
<i>Citharexylum hexangulare</i>																	X
<i>Citharexylum oleinum</i>				X		X			X				*				X
<i>Lantana achyranthifolia</i>							X		X	*	*	X		X			
<i>Lantana camara</i>	X	X					*	X	X	X		X	X	X	X		X
<i>Lantana hirta</i>		X					X							X			
<i>Lantana involucrata</i>							X		X					X			
<i>Lantana urticifolia</i>									X								
<i>Lantana urticoides</i>							X							X			
<i>Lantana velutina</i>							X										
<i>Lippia alba</i>					X					X							
<i>Lippia bracteosa</i>										X							
<i>Lippia graveolens</i>		X			*	X	*	X		*	X	X	X	X	X	X	X
<i>Lippia nutans</i>							X										
<i>Phyla nodiflora</i>										X							
<i>Priva aspera</i>						X											
<i>Verbena canescens</i>						X				X							
<i>Verbena carolina</i>														X			
<i>Verbena litoralis</i>														X			X
Viburnaceae																	
<i>Sambucus canadensis</i>							X										
Violaceae																	
<i>Pombalia oppositifolia</i>															X		
<i>Viola grahamii</i>														X			
Vitaceae																	
<i>Cissus tiliacea</i>		X					X							X			
<i>Cissus verticillata</i>						X	X			X							
Zygophyllaceae																	
<i>Guaiacum coulteri</i>							X										
<i>Kallstroemia brachystylis</i>							X							X			
<i>Kallstroemia hirsutissima</i>					X							X		X			
<i>Kallstroemia maxima</i>		X					X							X			X
<i>Kallstroemia parviflora</i>										X							
<i>Morkillia mexicana</i>	X	X	*		X	*	*	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Tribulus cistoides</i>							X							X			
<i>Tribulus terrestris</i>														X			



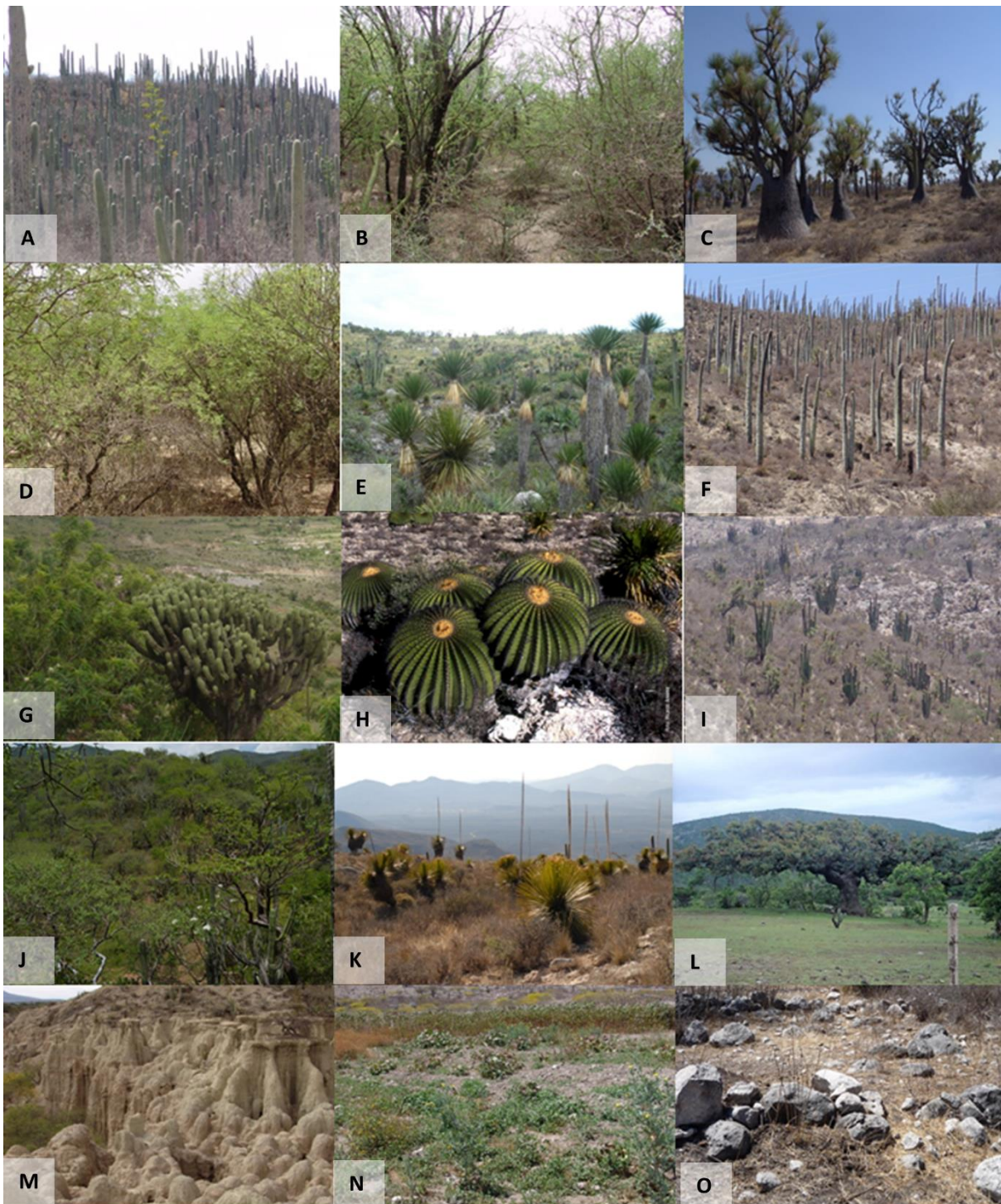
804
805
806
807

Figura 1. A) Cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla. B) Mapa de puntos de verificación en campo. C) Ubicación del municipio en Puebla.



808

809 Figura 2. Porcentaje de importancia de las variables para el modelo de bosques aleatorios (B1 - B7,
 810 bandas 1 a 7 de la imagen Landsat 8; Pre, precipitación anual; Aspect, orientación de laderas; DEM,
 811 modelo digital de elevación; Tma, temperatura máxima anual), indicando los valores de exactitud
 812 total y del índice de Kappa obtenidos para los clasificadores empleados en la etapa de evaluación y
 813 selección del modelo.
 814



815

816 Figura 3. Imágenes de las clases de cobertura vegetal y uso del terreno (CVUT) del municipio de Zapotitlán, Puebla. De
 817 izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: A) Tetechera *C. tetetzo*, B) Matorral espinoso con espinas laterales, C)
 818 Izotal *B. gracilis*, D) Mezquitil *P. laevigata*, E) Izotal de *Y. periculosa*, F) Cardonal *C. columna-trajani*, G) Chichipera de
 819 *P. chichipe*, H) Matorral de *E. platyacanthus*, I) Cardonal de *C. fulviceps*, J) Selva Baja Caducifolia, K) Matorral crasi-
 820 rosulifolio de *Dasylium* y *Agave*, L) Bosque de *Q. magnoliifolia*, M) Sin cobertura con suelo degradado, N) Zona
 821 agrícola, O) Sin cobertura.
 822



823
824
825
826
827
828
829
830
831

Figura 4. Composición de imágenes que muestra la distribución de las asociaciones vegetales en forma de mosaico y los límites entre ellas. A) Izotal de *B. gracilis*; B) vista panorámica de Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave*, en ladera alta, Cardonal de *C. fulviceps*, en ladera media y piedemonte; C) vista panorámica desde Matorral crasi-rosulifolio de *Dasyllirion* y *Agave* que muestra las zonas agrícolas con manchones de Izotal de *Y. periculosa* en la parte plana de una mesa; D) Cardonal de *C. fulviceps* sobre ladera; E) Mexical en la parte alta de la ladera y Tetechera *C. mezcalaensis* en la ladera media; F) vista panorámica de Tetechera *C. tetetzo* con Izotal de *Y. periculosa* e Izotal *B. gracilis*, sobre lomas; G) acercamiento de la anterior; H) Mezquital de *P. laevigata*; I) Tetechera de *C. tetetzo* y sus límites con el Mezquital; J) Cardonal de *C. columna-trajani* y sus límites hacia el Matorral espinoso con espinas laterales en la planicie.