



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

TRANSFORMACIÓN ANTROPOGÉNICA DE
MÉXICO: ENTRE LA GEOGRAFÍA NATURAL Y EL
LEGADO HISTÓRICO

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación Ecología)

Presenta

Charlotte Elizabeth. González Abraham

La Paz, Baja California Sur, Julio de 2015

ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12:00 horas del día 17 del Mes de Junio del 2015, se procedió por los abajo firmante miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

TRANSFORMACIÓN ANTROPOGÉNICA DE MÉXICO: ENTRE LA GEOGRAFÍA NATURAL Y EL LEGADO HISTÓRICO

Presentada por el alumno:

Charlotte E. González Abraham

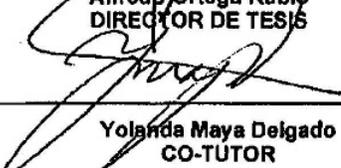
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN ECOLOGIA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA


Alfredo Ortega Rubio
DIRECTOR DE TESIS


Exequiel Ezcurrea
CO-DIRECTOR


Yolanda Maya Delgado
CO-TUTOR


Volker C. Radloff
CO-TUTOR


M. Octavio Aburto Oropeza
CO-TUTOR


DRA. ELISA SERVIERE ZARAGOZA,
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El comité tutorial fue integrado por:

Co-director Dr. Alfredo Ortega Rubio	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Co-director Dr. Exequiel Ezcurra	University of California-Riverside
Co-tutor Dra. Yolanda Maya Delgado	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Co-tutor Dr. Octavio Aburto Oropeza	University of California-San Diego
Co-tutor Dr. Volker C. Radeloff	University of Wisconsin-Madison

Comité revisor de la tesis

Dr. Alfredo Ortega Rubio	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Exequiel Ezcurra	University of California-Riverside
Dra. Yolanda Maya Delgado	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Octavio Aburto Oropeza	University of California-San Diego
Dr. Volker C. Radeloff	University of Wisconsin-Madison

Jurado de examen de grado

Dr. Alfredo Ortega Rubio	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Exequiel Ezcurra	University of California-Riverside
Dra. Yolanda Maya Delgado	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Octavio Aburto Oropeza	University of California-San Diego
Dr. Aurora Breceda Solís Cámara	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste

Suplente

Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
-----------------------------------	---

RESUMEN

Mediante el uso de información pública disponible sobre el uso de suelo y los caminos calculamos el Índice de la Huella Humana para todo México. Se identificaron los patrones espaciales de la transformación antrópica del territorio a nivel nacional y desarrollamos el mapa de la huella humana para todo el país identificando las regiones ecológicas que tienen mayor transformación debido a las actividades humanas. Adicionalmente, analizamos como la geografía física, expresada espacialmente en la forma de biomas y ecorregiones, comparada con los legados históricos, expresado como la distribución espacial de los asentamientos históricos, promueven o limitan los patrones de transformación humana de la superficie terrestre. México mantiene el 56 por ciento de su superficie terrestre con niveles bajos de impacto antrópico, sin embargo, éstas áreas no están uniformemente distribuidas. Los valores más bajos se localizan en la región árida del norte y noroeste así como en la región tropical del sureste del país. Los valores más altos se encuentran a lo largo de la costa del Golfo de México y desde ahí entran en dirección Este-Oeste a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal y sus planicies asociadas. La distribución de las áreas con valores altos y bajos de huella humana entre las ecorregiones revela un complejo mosaico: los desiertos que en general cuentan niveles bajos de transformación tienen áreas agro-industriales altamente transformadas, mientras que regiones con muy altos niveles de huella humana todavía cuentan con áreas que perduran con bajo nivel de transformación sobre todo en la parte central del país. Concluimos que a escala de bioma el patrón de espacial de la huella humana es resultado de las limitaciones por su geografía física al desarrollo humano. Sin embargo, a nivel ecoregional (dentro de los biomas) la geografía física es tan importante como la compleja historia de civilizaciones pasadas y sus tecnologías, incluyendo la explosión demográfica del siglo XX y el patrón espacial de los asentamientos humanos antes de la Colonia Española.

ABSTRACT

Using publicly available data on land use and transportation corridors we calculated the human footprint index for the whole of Mexico to identify large-scale spatial patterns in the anthropogenic transformation of the land surface. We developed a map of the human footprint for the whole country and identified the ecological regions that have most transformed by human action. Additionally, we analyzed the extent to which (a) physical geography, expressed spatially in the form of biomes and ecoregions, compared to (b) historical geography, expressed as the spatial distribution of past human settlements, have driven the patterns of human modification of the land. Overall Mexico still has 56% of its land surface with low impact from human activities, but these areas are not evenly distributed. The lowest values are on the arid north and northwest, and the tropical southeast, while the highest values run along the coast of the Gulf of Mexico and from there inland along an east-to-west corridor that follows the Mexican transversal volcanic ranges and the associated upland plateau. The distribution of low- and high footprint areas within ecoregions forms a complex mosaic: the generally well-conserved Mexican deserts have some highly transformed agro-industrial areas, while many well-conserved, low footprint areas still persist in the highly-transformed ecoregions of central Mexico. We conclude that the spatial spread of the human footprint in Mexico is both the result of the limitations imposed by physical geography to human development at the biome level, and, within different biomes, of a complex history of past civilizations and technologies, including the 20th Century demographic explosion but also the spatial pattern of ancient settlements that were occupied by the Spanish Colony.

DEDICATORIA

A todas las personas que han cooperado en la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por otorgarme la beca de doctorado para desarrollar este trabajo.

Esta investigación es parte de los trabajos desarrollados por la Red Nacional de Áreas Naturales Protegidas (RENANP) de las Redes Temáticas de Investigación de CONACYT

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	5
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
HIPÓTESIS	9
MATERIALES Y MÉTODOS	9
SELECCIÓN DE LAS BASES DE DATOS Y LA RESOLUCIÓN ESPACIAL	10
ASIGNACIÓN DE VALORES	10
ESTIMACIÓN DE LA MODIFICACIÓN ANTRÓPICA DIRECTA	12
EL MAPA DE LA HUELLA HUMANA	13
LA GEOGRAFÍA FÍSICA Y LA HUELLA HUMANA	13
LOS ASENTAMIENTOS PREHISPÁNICOS Y LA HUELLA HUMANA	14
LA HUELLA HUMANA EN LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DE MÉXICO	15
RESULTADOS	16
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA HUELLA HUMANA EN MÉXICO	16
BIOMAS, ECORREGIONES Y LA HUELLA HUMANA	17
LA HUELLA HUMANA EN LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS	25
DISCUSIÓN	30
CONCLUSIONES	35
LITERATURA CITADA	38
ANEXOS	44

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de la huella humana.....	17
Figura 2. Mapa del promedio de la huella humana por regiones.....	18
Figura 3. Huella ecorregional anidada en biomas.	22
Figura 4. Propiedades estadísticas de la HF por ecorregiones.....	23
Figura 5. Distribución de los asentamientos prehispánicos en México.	25
Figura 6. IC de las ANP* en relación a su ecorregión	30
Figura 7. Población en México entre 1521 y 2010.	34

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de transformación humana	12
Tabla 2. Ecorregiones de México ordenadas de acuerdo a su valor promedio de huella humana.	19
Tabla 3. ANOVA	24
Tabla 4. Área protegida total por ecorregión	27

INTRODUCCIÓN

El ser humano ha transformado los sistemas ecológicos del planeta para satisfacer las necesidades y demandas de una población en continuo crecimiento. Desde la década de los 80s los descubrimientos científicos evidencian que casi todo el planeta ha sido habitado, modificado o manipulado a lo largo de la historia humana (Vitousek *et al.*, 1986; Sanderson *et al.*, 2002; Ellis *et al.*, 2010). El ser humano ha domesticado ecosistemas para su propio beneficio. Las alteraciones generadas se han realizado en la búsqueda de aumentar la productividad, la capacidad de transporte o reducir la fuerza destructiva de la naturaleza. En 1700 casi la mitad de la superficie terrestre estaba aún libre de influencia humana, pero hacia principios del siglo XXI la mayor parte de la biosfera ya estaba ocupada por áreas agrícolas y asentamientos humanos (Ellis *et al.*, 2010). Algunos cambios han sido menores, las zonas boreales y los desiertos han tenido cambios mayoritariamente en áreas previamente transformadas, sin embargo el 80% de los pastizales y las sabanas silvestres en todo el mundo han sido transformadas a sistemas productivos completamente antropizados (Ellis *et al.*, 2010). En 1995 menos del 17% de la superficie terrestre se encontraba libre de influencia humana directa (Sanderson *et al.*, 2002).

Los patrones y procesos ecológicos terrestres son influenciados por las actividades antrópicas de dos formas: (a) directamente mediante la transformación de la superficie terrestre hacia infraestructura o áreas productivas (Meyer y Turner, 1992), y (b) indirectamente mediante los efectos secundarios de las actividades antrópicas (Reid *et al.*, 2005) La infraestructura humana (rutas de transporte, asentamientos humanos y líneas eléctricas) así como las áreas productivas (agricultura, ganadería, silvicultura y acuicultura) han aumentado de manera dramática en el último siglo como resultado del acelerado aumento de la población (Meyer y Turner, 1992).

Diversos estudios han analizado los patrones de modificación de la superficie terrestre y han generado índices de la influencia humana en los

ecosistemas naturales (e.g., Leu *et al.*, 2002; Machado, 2004; Sanderson *et al.*, 2004; Woolmer *et al.*, 2008; Theobald, 2013). A pesar de que es difícil incluir la totalidad de la modificación antrópica a través de índices, son de gran utilidad para caracterizar cuantitativamente el patrón espacial y la extensión de los cambios generados por el ser humano en la Tierra. La mayor parte de los estudios se enfocan en identificar las transformaciones antrópicas sobre los ecosistemas así como su capacidad de respuesta (e.g., Foley *et al.*, 2005; Ellis *et al.*, 2010), pero muy pocos analizan cómo la geografía física promueve o limita la modificación humana.

En principio se esperaría que la complejidad ambiental haya influido en la conformación del patrón geográfico actual de la transformación antrópica. Es decir, las regiones en donde las condiciones ambientales son más favorables para el desarrollo humano deberían presentar una mayor modificación resultado de las actividades humanas. Sin embargo, los asentamientos humanos y las transformaciones del paisaje no son solo resultado de las características ambientales de una región; también existen componentes históricos y tecnológicos ligados a la habilidad de diferentes sociedades para usar diferentes ambientes. Estos componentes pueden tener una profunda influencia en regiones que han albergado asentamientos humanos de gran densidad durante milenios (Gomez-Pompa y Kaus, 1992; Turner y Butzer, 1992). La dimensión histórica es especialmente relevante en México debido a su larga historia de uso intensivo y colapsos de civilizaciones en la región mesoamericana. A la llegada de los españoles a Mesoamérica en 1521 la población humana era del orden de 20 millones (Cook, 1947; Borah y Cook, 1969; Denevan, 1992). A pesar de que la población nativa fue devastada por las enfermedades que trajeron los europeos, el Sistema de Encomienda y las sequías del siglo XVI (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrel *et al.*, 2006), su distribución geográfica a la llegada de los españoles condicionó la ocupación posterior del territorio y sus transformaciones. La elevada densidad de población existente antes de la llegada de los españoles estaba acompañada de extensas áreas productivas con sistemas de irrigación, bosques y

selvas transformadas para beneficio humano (Sanders, 1991; Whitmore y Turner, 2001). Una consecuencia de la tragedia demográfica fue el abandono de numerosas áreas productivas por parte de los habitantes indígenas y su apropiación por parte de los españoles (Borah y Cook, 1969). Por ejemplo, la ganadería empezó por utilizar las áreas agrícolas en regiones semiáridas abandonadas y de ahí se expandió hacia otras regiones (Melville, 1994).

A la transformación humana directa de la superficie terrestre se le denomina “huella humana”. En 2002 Sanderson *et al.* desarrollaron un índice espacialmente explícito que muestra en mapas la suma de todas las transformaciones antrópicas visibles sobre territorios amplios (Sanderson *et al.*, 2002). Utiliza cuatro variables básicas: densidad poblacional, uso del suelo, infraestructura eléctrica y áreas de transporte (e.g. caminos, ríos navegables). Este tipo de índices fue diseñado para identificar áreas con niveles bajos o nulos de transformación, básicamente como una herramienta para la conservación. Con ese objetivo se ha usado y modificado en diferentes estudios. En Texas, USA, se utilizó para identificar si las estrategias de conservación a lo largo de 20 años habían sido exitosas (Haines *et al.*, 2008). En un estudio realizado en los Montes Apalaches se aplicó a escala ecorregional para identificar niveles de transformación del paisaje, y se comprobó que a escalas ecológicas regionales permite identificar áreas donde la implementación de estrategias de conservación sería más eficiente (Woolmer *et al.*, 2008). En Guyana Francesa se sobrepuso espacialmente la huella humana y la abundancia de grandes vertebrados en todo el país para identificar áreas donde la transformación humana puede potencialmente afectar a las poblaciones de los vertebrados (de Thoisy *et al.*, 2010).

A pesar de sus ligeras modificaciones en estos estudios la base conceptual es la misma: la intensidad de la huella humana sobre la superficie terrestre está en función del tipo de actividad, su extensión y la acumulación espacial de dichas actividades. Las ventajas de este índice radican en que está basado en cálculos sencillos, es fácil de interpretar y reproducir, y utiliza bases de datos que son

generalmente de dominio público (Haines *et al.*, 2008; Theobald, 2013). En este estudio se presenta un mapa de la huella humana para todo México siguiendo la metodología básica del estudio original (Sanderson *et al.*, 2002).

Dentro de los esfuerzos para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas debido a las actividades humanas se han creado áreas naturales protegidas (ANP) en todo el planeta. Las áreas naturales protegidas tienen como principal objetivo la protección de ecosistemas y su biodiversidad que a su vez proporcionan servicios ecosistémicos y de bienes para el desarrollo humano (Ervin, 2003a; IUCN, 2005). Las ANPs son una de las herramientas de protección ambiental más eficientes en cuanto a su relación costo-eficiencia (Balmdford *et al.*, 1995). Es posible que por esta razón desde 1975 el área protegida se ha duplicado a nivel global, actualmente cubre alrededor del 10% de la superficie terrestre, y se considera uno de los grandes logros en la conservación del Siglo XX (Phillips, 2000). Esta tendencia se mantiene ya que algunos gobiernos parecen estar dispuestos a continuar con esta tendencia, al menos en áreas con baja densidad poblacional (Dudley *et al.*, 1999).

En sitios con abundantes asentamientos humanos las reservas naturales representan los únicos sitios que mantienen los tipos de hábitat y las poblaciones de especies nativas. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos por mantener las áreas naturales protegidas con su integridad ecológica intacta o con mínimos efectos antrópicos, éstas se enfrentan a las mismas amenazas que el resto de la superficie terrestre (Ervin, 2003a). Las actividades humanas dentro y fuera de las ANPs han generado deforestación, fragmentación de hábitat, colonización e invasión de especies exóticas, incendios y contaminación (Ervin, 2003a). La creciente demanda de recursos en las proximidades de los límites de las reservas ha generado un efecto de aislamiento espacial resultando que, en muchos casos la extracción de recursos sea mayor dentro de las reservas que afuera (Liu *et al.*, 2001; Brandt *et al.*, 2015; Bragina *et al.*, 2015). La magnitud de la afectación depende de múltiples factores: la vulnerabilidad de los ecosistemas que contiene, influidos por su geografía física (Más, 2005); la eficiencia en el manejo, que está

influenciado por el financiamiento con el que cuenta (Ervin, 2003a, b); finalmente la historia y contexto socioeconómico en el que se encuentran (de Sherbinin y Freudenberg, 1998), es decir sus legados históricos que incluyen su edad, su categoría de protección y su área total (Pressey *et al.*, 2002).

ANTECEDENTES

México es un país ecológicamente heterogéneo que hospeda un amplio rango de ecosistemas diversos, desde desiertos de extrema aridez hasta los bosques tropicales húmedos. Estos ecosistemas han evolucionado como consecuencia de una topografía compleja y la particular localización del país entre los reinos biogeográficos Neártico y Neotropical. México es también uno de los países megadiversos a escala mundial, con altos niveles de endemismo de aves, reptiles y mamíferos (Mittermeier *et al.*, 1997).

Al inicio de 1900 la población total de México era de alrededor 13 millones, en el año 2010 la población había aumentado hasta 112 millones (INEGI, 2010). El desarrollo económico del país durante el inicio del siglo XX y el aumento de población promovió la expansión de la infraestructura de transporte y de generación de energía, al tiempo que aceleró el cambio de uso de suelo. Numerosos asentamientos humanos se convirtieron en ciudades y para finales de la década de 1970 la mitad de la población vivía en ciudades (ONU-HABITAT, 2011), en contraste, en el resto del mundo este nivel de urbanización se alcanzó dos décadas después (ONU-HABITAT, 2011).

Durante los últimos 50 años se han realizado diferentes esfuerzos para evaluar la influencia humana sobre el territorio y los ecosistemas mexicanos. Los estudios sobre los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo han dominado la mayor parte de la investigación ambiental ya que constituyen una herramienta de gran utilidad para identificar procesos de cambio a diferentes escalas espaciales. Normalmente estos estudios se realizan con información espacialmente explícita (fotografías aéreas, imágenes de satélite o mapas temáticos de cobertura). En México se han generado múltiples estudios de cambio

de uso de suelo a nivel local y regional. Algunos ejemplos: en Michoacán se calculó el cambio de uso de suelo y la tasa de deforestación para el periodo de 1970 a 1990 a nivel municipal (Bocco *et al.*, 2001; Rosete, 2008; Rosete Vergés *et al.*, 2008); en Quintana Roo y Campeche se analizó la superficie de selvas y sabanas que sufrieron transformación hacia áreas agrícolas y ganaderas entre 1975 y 1990 (Cortina Villar *et al.*, 1998), y en el sistema lagunar de Ceuta, Sinaloa, se identificaron las tendencias de cambio de la cobertura vegetal nativa hacia la acuacultura camaronícola industrial entre 1984 y 1999 (Alonzo-Pérez *et al.*, 2003). Sin embargo, dos esfuerzos a escala nacional requieren principal mención, el Inventario Nacional Forestal y las cartas de uso de suelo y vegetación.

El Inventario Nacional Forestal es un trabajo continuo que desde 1961 ha registrado los cambios en la cobertura forestal nacional (Prieto *et al.*, 2000). A la fecha se han realizado cinco inventarios forestales de cobertura nacional: Primer Inventario Nacional Forestal 1961-1985, Inventario Nacional Forestal de Gran Visión 1991, Inventario Nacional Forestal Periódico 1994, Inventario Forestal Nacional 2000 e Inventario Nacional forestal y de Suelos 2004-2009. Sin embargo sólo el Primer Inventario Nacional Forestal 1961-1985 y el Inventario Nacional forestal y de Suelos 2004-2009 pueden considerarse inventarios completos. Inicialmente solo se consideraba la cobertura arbórea de importancia económica, sin embargo poco a poco se ha incluido otros tipos de vegetación. En total se han realizado cinco inventarios, sin embargo cada uno ha caracterizado la cobertura forestal de forma diferente haciendo que las comparaciones temporales sean complejas (Prieto *et al.*, 2000). A pesar de esta dificultad, en el análisis del año 2000 se identificaron patrones de transformación para todo el país (e.g., aproximadamente el 30 por ciento del territorio continental mexicano son áreas de cultivo y pastizales) (SEMARNAT, 2012). Diversos estudios independientes han generado estimaciones de cobertura forestal desde la década de los 1980s, sin embargo los estudios son regionales y sus resultados derivan de fuentes indirectas (Velázquez *et al.*, 2002).

Desde la década de los 1970s el INEGI ha realizado inventarios generando mapas temáticos de Uso de Suelo y Vegetación para todo el país. En total ha generado 4 series y la más reciente describe la vegetación existente y los usos de suelo en el año 2007. Utilizando la información generada por el INEGI para las cartas temáticas de Uso de Suelo y Vegetación, la SEMARNAT en conjunto con el INEGI y la UNAM han analizado las tasas de cambio y las tendencias nacionales de uso de suelo (SEMARNAT, 2012). En el año 2012 se identificaron las tasas de cambio desde 1968 hasta 2007 identificando los tipos de cobertura vegetal con mayor cambio y degradación (SEMARNAT, 2012), este estudio se enfocó en los cambios a escala nacional y estatal y formó parte del compendio de estadísticas ambientales para el Informe de la Situación del Medio Ambiente (SEMARNAT, 2012).

A pesar de que durante 40 años se han realizado los inventarios de uso de suelo, no son comparables debido a las diferentes fuentes de información usadas. A pesar de que las estimaciones cuantitativas no son tan precisas como se desearía, la información disponible permite identificar tendencias. De esta manera las estadísticas ambientales del el Informe de la Situación del Medio Ambiente (SEMARNAT, 2012) muestran que en cuanto a superficie neta perdida, las selvas han perdido más del 40% de su extensión original y los bosques alcanzan un 27% de pérdida. Durante los años setenta los pastizales dedicados a la ganadería y las tierras agrícolas ocupaban 40.3 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2012). Desde la década de los setenta hasta los noventa, estas coberturas antrópicas aumentaron su extensión en 6.3 millones de hectáreas, y del 2002 al 2007, los pastizales cultivados y la agricultura alcanzaron ya una extensión de 51.1 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2012).

Como en el resto del mundo, México ha generado instrumentos de política ambiental destinados a proteger el medio ambiente y restaurar el equilibrio ecológico. A las áreas naturales protegidas se les considera como la mejor herramienta para la conservación de la biodiversidad y los servicios ambientales que proveen (Ervin, 2003a; CONABIO, 2010). En México existen áreas naturales

protegidas federales, estatales, municipales o del Distrito Federal, privadas, comunitarias y áreas destinadas voluntariamente a la conservación, así como 13 tipos de categorías de protección (Ortega-Rubio *et al.*, 2014). En total el 9.8% de la superficie terrestre del país se encuentra bajo alguna categoría de protección, ligeramente por debajo de la media a nivel mundial que es del 11.5% (Chape *et al.*, 2003).

A pesar de ser zonas seleccionadas para la conservación, las áreas naturales protegidas en México son zonas con usos múltiples, en la mayor parte de ellas se desarrollan actividades desde antes de su declaración de protección. De acuerdo con el INEGI, 279 ANPs, de las 900 que existen en el país, cuentan con asentamientos humanos permanentes y en el año 2005 por lo menos el 3.3% de la población total del país residía en alguna ANP. Es decir, están sometidas a las mismas presiones, no obstante con menor intensidad, que el resto del territorio nacional (Mas, 2005; Figueroa y Sánchez-Cordero, 2008). Es decir, las actividades dentro y en sus fronteras generan una presión antrópica que puede estar limitando la capacidad protectora de éstas áreas.

JUSTIFICACIÓN

Los humanos son un factor determinante en el funcionamiento de los sistemas ecológicos a escalas locales, regionales y globales. Por lo tanto, conocer la dimensión ecológica de las actividades humanas es necesario para entender el funcionamiento de los sistemas ecológicos.

Previo al desarrollo de esta investigación, no existían estudios que analizaran la dimensión ecológica de las actividades humanas de forma cuantitativa a nivel de todo México.

OBJETIVOS

Objetivo general

Cuantificar y analizar el patrón geográfico de la transformación ecológica de las actividades humanas en México.

Objetivos específicos

Objetivo 1. Determinar la relación entre la variación de la transformación humana actual del territorio y la variación ambiental a diferentes escalas espaciales: biomas y ecorregiones.

Objetivo 2. Analizar la correlación espacial de la transformación humana actual del territorio con el escenario de poblamiento prehispánico.

Objetivo 3. Determinar la variación entre la huella humana de las áreas naturales protegidas y de la ecorregión que las hospeda.

HIPÓTESIS

Es de esperar que la heterogeneidad ambiental y la historia de ocupación humana de México influyan en el patrón geográfico actual de su transformación antrópica.

Se espera que las áreas naturales protegidas presenten menor grado de transformación que las ecorregiones en que se encuentran.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para generar el mapa de la huella humana para todo México se desarrolló una base de datos espacial que nos permitió identificar diversas actividades antrópicas sobre la superficie terrestre en México: asentamientos humanos, superficie terrestre cultivada (agricultura, silvicultura, y pastizales manejados), costas cultivadas (acuacultura marina) y caminos (carreteras pavimentadas y caminos de terracería).

Selección de las bases de datos y la resolución espacial

Usamos la información espacial disponible para México con una resolución consistente y detallada para todo el país. Se utilizaron los mapas digitales vectoriales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), y se complementaron con mapas de caminos y carreteras del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). De los mapas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI (serie III a escala 1:250,000) se extrajeron la distribución espacial de las zonas urbanas, agrícolas, forestales, acuícolas y pastizales manejados. Las zonas rurales (< 2,500 personas) se obtuvieron del Censo de Población de 2010 del INEGI. Los caminos, carreteras y caminos de terracería se obtuvieron del IMT (escala 1:200,000). Para reducir el riesgo de errores de pequeña escala se escogió una resolución analítica de 500 m (celdas de 500 m × 500 m).

Asignación de valores

La modificación humana en un lugar determinado es función de dos factores: intensidad y extensión (Theobald, 2013). Intensidad es el grado en el que una actividad ha transformado el ecosistema original. Nosotros incorporamos el factor de intensidad a través de la asignación de valores numéricos a las fuentes directas de transformación humana (actividades o infraestructura). La extensión mide el área de la actividad humana en una localidad seleccionada. Debido a que la resolución espacial (500 m) y a la dificultad de estimar rigurosamente la extensión aérea de las transformaciones humanas en cada celda, la extensión se calculó con un criterio de presencia/ausencia por pixel. Es decir se consideró que cada actividad estaba presente en una celda si ocupaba al menos la mitad de ella.

Siguiendo la metodología de Sanderson *et al.* (2002) y con base en el grado de irreversibilidad de la transformación asignamos valores entre 0 (bajo) y 10 (alto) a cada categoría de transformación humana de la superficie terrestre (Sanderson *et al.*, 2002; Haines *et al.*, 2008; Woolmer *et al.*, 2008; Theobald, 2013;) (Tabla 1). Se seleccionaron todas las áreas urbanas en el mapa de uso de suelo y vegetación y se les consideró como áreas de alta densidad poblacional dándoles

un valor de 10 (Tabla 1). Para calcular la densidad de población y asignar valor a las celdas sin zonas urbanas se utilizó la densidad poblacional a nivel de celda. Con base en el Censo 2010 (INEGI, 2010) se asignaron las localidades y su correspondiente número de habitantes a cada una de las celdas no urbanas. Las celdas que obtuvieron más de 2500 habitantes se les consideró urbanas y se añadieron a la categoría de área urbana. Las celdas con menos de 2500 habitantes y hasta 500 se les asignó un valor de 7, mientras que celdas con menos de 500 habitantes recibieron un valor de 5.

Otros tipo de uso de suelo (agricultura, pastizales manejados, plantaciones forestales y acuacultura marina) también fueron extraídos del mapa de Uso de Suelo y Vegetación (INEGI, 2004) y cada uno fue guardado como una capa de información individual. A la agricultura y la acuacultura que destruyen por completo la cobertura natural pero mantienen cierto grado funcionalidad recibieron el valor de 7, mientras que a los pastizales manejados y las plantaciones forestales que mantienen una cobertura natural más permanente y parte de la flora nativa se les asignó un valor de 5. Las áreas urbanas que destruyen irreversiblemente la cobertura nativa y el substrato, recibieron el valor de 10 (Liu *et al.*, 2003).

Los caminos y carreteras fueron divididos en dos categorías generales que difieren con base en su relativa modificación del suelo: pavimentados y terracerías. Los caminos en las bases de datos originales están representados como elementos lineales y por lo tanto su área equivale a cero. Transformamos los elementos lineales mediante un buffer de 250 m a cada lado del camino pavimentado y de 100 m en los caminos de terracería (Hawbaker *et al.*, 2006). Con base en las diferencias en el nivel de transformación de los dos tipos de caminos y carreteras (Forman, 2000; Riitters y Wickham, 2003; Coffin, 2007), se asignó un valor de 5 a los caminos de terracería y 8 a los caminos y carreteras pavimentadas (Tabla 1). No se incluyeron los ríos navegables o las líneas de tren en el análisis porque no juegan un rol significativo como corredores de transporte en México. El número de carriles en los caminos y carreteras tampoco se consideró puesto que esa información no está disponible en las bases de datos.

Tabla 1 Valores de transformación humana

Proxies	HT Valor
Urbano	10
Rural (500–2499 habitantes)	7
Rural (< 500 habitantes)	5
Agricultura	7
Acuicultura marina	7
Plantaciones forestales	5
Pastizales cultivados y naturales	5
Caminos pavimentados	7
Caminos de terracería	5

Los valores fueron asignados según el grado de irreversibilidad de la transformación humana y con base en estudios previos de huella humana (Sanderson *et al.*, 2002; Haines *et al.*, 2008; Woolmer *et al.*, 2008; Thoisy *et al.*, 2010).

Estimación de la modificación antrópica directa

Para calcular el efecto total del uso de suelo y la infraestructura se convirtieron todos los mapas vectoriales, con las fuentes humanas de transformación de la superficie, a formato ráster con un tamaño de pixel de 500 m x 500 m. Posteriormente a cada pixel se le asignó el valor de modificación antrópica (Tabla1). De acuerdo con nuestro criterio umbral, solo un actividad puede estar representada espacialmente en cada celda, excepto en el caso de los caminos y carreteras, que se pueden superponer al resto de las actividades. Por lo tanto, al sumar los valores del factor presente en una celda y de algún tipo de camino el valor resultantes podría exceder el valor máximo de modificación antrópica (10).

Para resolver este problema se usó la suma algebraica “fuzzy” de los valores de las actividades y así reducir los errores originados de la parcial dependencia entre capas que coincidan en la misma celda (pixel) (Theobald, 2013). Este método primero re-escala los valores de 0 a 1 y asume que pixeles que contengan más de una capa de actividad deberán tener un valor de modificación antrópica mayor que aquellos con solo una capa. Por lo tanto el valor

de la transformación antrópica directa HT_i (en una escala numérica de 0 a 1) para cada pixel i es calculada como , donde h_{ij} representa el valor de modificación para cada factor j presente en el pixel i .

$$HT_i = 1 - \prod_{j=1}^9 (1 - h_{ij})$$

Los valores de HT_i están en un rango entre 0 y un máximo de 1, imponiendo un valor real máximo al límite de los valores posibles. Finalmente re-escalamos los valores de 0 a 10 para la presentación de resultados.

El mapa de la huella humana

Finalmente, el mapa se suavizó para incluir los efectos de los pixeles vecinos mediante el promedio del valor de cada celda con la de sus ocho vecinas inmediatas (i.e., una media móvil que consideró un vecindario de 3 x 3 celdas). Al mapa resultante se le definió como la huella humana (HF), y representa una estimación de los patrones espaciales de la modificación humana directa sobre la superficie terrestre mexicana. Este mapa contiene valores cuantitativos de HF en un rango de 0 a 10, en donde 0 representa niveles muy bajos de transformación humana directa y 10 los valores más altos de acumulación de transformación humana. Es importante resaltar que debido al uso de la media móvil utilizando las celdas circunantes, el valor de 0 en una celda indica que las ocho celdas vecinas han de tener también valor de cero.

La geografía física y la huella humana.

Utilizamos el mapa de las regiones ecológicas de Norteamérica (CCA, 1997), usado por INEGI para México de manera oficial. El nivel I de este mapa define regiones a gran escala con base en patrones continentales similares de geografía física, clima y fisionomía de la vegetación. Son comparables en escala y alcance al concepto de bioma. El nivel II está anidado dentro del nivel I y provee subdivisiones ecorregionales que comparten dentro del bioma características similares en fisiografía, historia biogeográfica, diversidad y endemismos (CCA, 1997). Se utilizaron los nombres de los biomas y ecorregiones en Inglés y las

equivalencias se pueden consultar en los Anexos 1 y 2. Se analizó cómo la geografía ecológica (expresada en ecorregiones y biomas) influyen en el patrón geográfico de la huella humana. Para caracterizar el patrón geográfico de la huella humana calculamos: (a) las propiedades de la distribución estadística (promedio, desviación estándar y asimetría) de la huella humana dentro de cada ecorregión y bioma, y (b) el parche promedio y el porcentaje de área en cada ecorregión con el valor más bajo de huella humana ($HF = 0$).

Finalmente se descompuso la varianza total de la huella humana en tres componentes de la ANOVA: (a) la varianza explicada por las diferencias en la huella humana entre los biomas, (b) la varianza explicada por las diferencias en la HF entre las ecorregiones dentro de los biomas, y (c) la varianza residual o varianza dentro de las ecorregiones. Debido a que la información se generó a nivel de pixel pero promediado con sus vecinos directos, usamos el número de vecindarios para los grados de libertad para el análisis de ANOVA (el número de celdas totales fue de 7,793,854 y se usaron 865,984 grados de libertad).

Los asentamientos prehispánicos y la huella humana

También probamos si existe una asociación espacial entre la presencia de asentamientos prehispánicos y la huella humana moderna. Primero localizamos las coordenadas de los principales 183 sitios prehispánicos en México, compilación realizada y avalada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH; <http://www.geoportal.inah.gob.mx/>). Esta lista se complementó con las listas de los principales asentamientos prehispánicos para el centro de México (Kellog, 2011; Whitmore y Turner, 2001), la Región Maya (Whitmore y Turner, 1992; Sharer, 1994).

Se usaron estos sitios para crear un mapa que se sobrelapó con el mapa de las ecorregiones y se identificaron las ecorregiones que albergaban mayor cantidad de sitios prehispánicos. Mediante el uso de una prueba de t para la comparación entre medias, probamos la hipótesis de que las ecorregiones que albergaron una intensa ocupación prehispánica muestran valores de la huella

humana más altos que aquellas regiones que no albergaron asentamientos prehispánicos. Debido al proceso de comparación de múltiples medias, la prueba de t se ajustó con la corrección de Bonferroni.

La huella humana en las Áreas Naturales Protegidas de México

El índice de HF fue estimado con datos previos a 2010, por tanto descartamos aquellas áreas naturales protegidas (ANP) establecidas en fechas posteriores. En 2010 existían en México 174 ANP bajo alguna categoría de conservación (CONANP, 2010). Se extrajeron las ANP del mapa digital de la CONANP y para evitar distorsiones por efecto de área reducida descartamos aquellas con una extensión inferior a 100 km². Cruzamos el mapa con los polígonos de las 75 ANP resultantes con el mapa de ecorregiones para establecer la pertenencia de las ANP entre las ecorregiones. En los casos en que una ANP está en dos o más ecorregiones adjudicamos cada fragmento a su ecorregión correspondiente. Por ello, la unidad espacial de análisis del área conservada fue el área del ANP o fragmento de la misma que está dentro de cada ecorregión, y que representaremos en adelante como ANP*.

Consideramos que la función potencial de conservación de un área protegida puede ser expresada por la diferencia de su HF y el de la ecorregión en la que se encuentra. Estimamos el valor promedio de HF para cada ANP* y lo comparamos con el de su ecorregión. Utilizamos una prueba *t-Student* para estimar si la diferencia es significativa estadísticamente ($p < 0.05$). Definimos un índice de conservación (IC) para cada ANP* combinando el valor de la diferencia relativa de HF respecto a su ecorregión y la significancia estadística de la misma. Si no hay significancia estadística, consideramos que $IC = 0$. Cuando existe significancia estadística el valor de IC es calculado como la diferencia entre el HF promedio de la ANP* y el su ecorregión, ponderada por el HF promedio de la ecorregión, $CI = 1 - HF_{NPA^*}/HF_{ECO}$.

Finalmente se generó un mapa conjunto de ecorregiones con su valor promedio de *HF* y de las ANP* con el valor de su índice de conservación (*IC*), y se analizó el patrón espacial resultante.

RESULTADOS

Descripción general de la huella humana en México

La mitad del país (55.9 % de la superficie total) tiene valores de muy baja huella humana ($HF = 0$; Figura 1). Esto indica que la mitad de México todavía mantiene una cobertura vegetal en buenas condiciones ambientales. Del resto de la superficie, solo el 10.3% cayó dentro de la categoría de muy alta huella humana ($HF = 7$). El restante 33% pertenece a valores intermedios.

Las áreas con los valores de huella humana más altos muestran un patrón espacial bien definido (Figura 1), se distribuyen a lo largo de las costas del Golfo de México y a través de un corredor hacia el interior con dirección este-oeste que sigue el Eje Neovolcánico Transversal y sus planicies asociadas. Áreas con alta *HF* son también visibles a lo largo de la costa este del Golfo de California (Figura 1). Por el contrario, el noroeste árido y el sureste de México (predominantemente la península de Yucatán) presenta valores relativamente bajos de huella humana. El resto del sur del país (la región al sur del Eje Neovolcánico Transversal en dirección al Pacífico) contiene un mosaico de valores altos y bajos de huella humana (Figura 1).

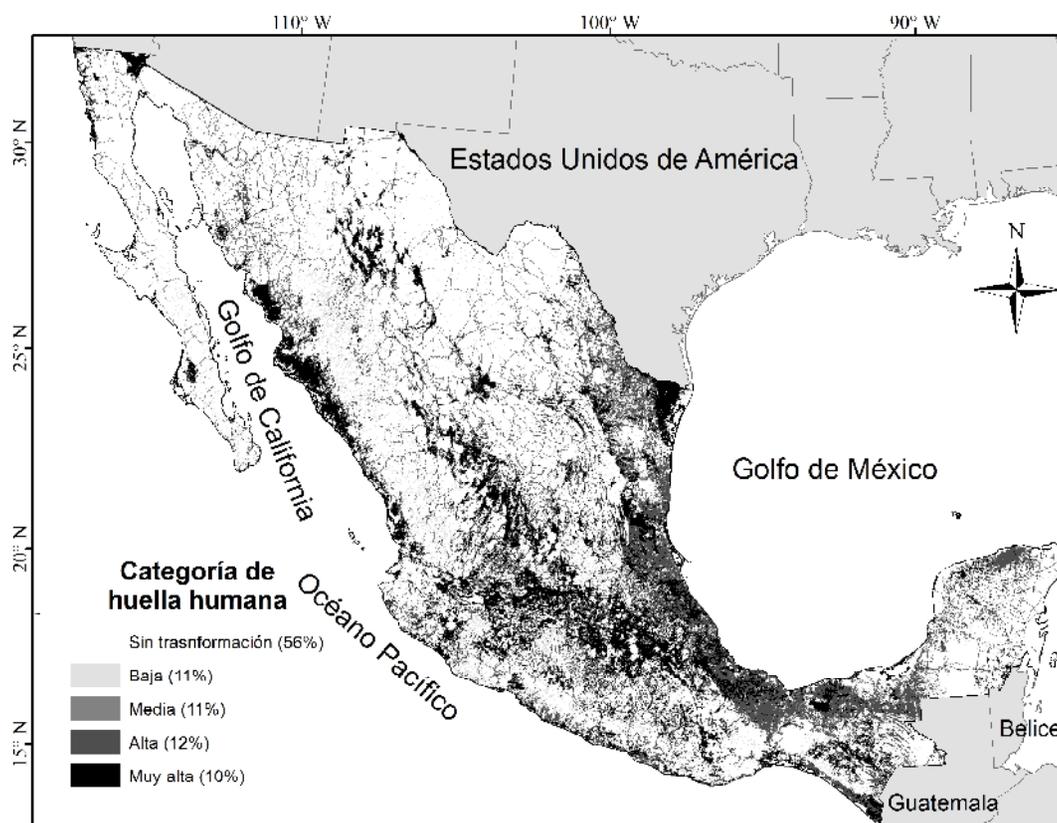


Figura 1. Mapa de la huella humana. El valor de la huella humana se representa en tonos de grises, siendo el negro el valor más alto (10) y el blanco el más bajo (0)

Biomás, ecorregiones y la huella humana

Los intervalos establecidos para categorizar el valor medio de la huella humana son los siguientes: baja ($HF < 1$), media ($HF > 1 < 3$) y alta ($HF > 3$). La distribución de los valores medios de HF para los biomas y las ecorregiones se muestra en la Tabla 2 y en las Figura 2 y 3.

La ecorregión costera *Sierra Los Tuxtlas* (que se encuentra en el bioma Bosques Tropicales Húmedos y que es el bosque tropical con mayor cantidad de cobertura original desmontada para pastizales) muestra el valor de huella humana más alto ($HF = 4.74$), mientras que la *Sierra Madre Occidental* (dentro del bioma Sierras Templadas) tuvo el valor más bajo de huella humana ($HF = 0.52$, Tabla 2).

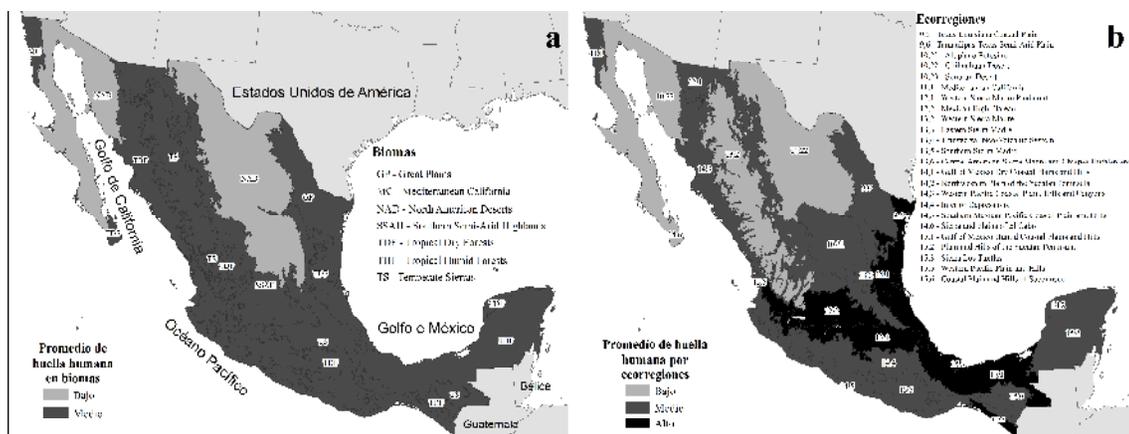


Figura 2. Mapa del promedio de la huella humana por regiones. Biomás (a) y ecorregiones (b) de México agrupados en categorías definidas por su promedio de huella humana (bajo, medio y alto, con valores promedio $HF < 1$; $1 < HF < 3$, y $HF > 3$, respectivamente)

Solo dos ecorregiones, el *Chihuahuan Desert* y el *Sonoran Desert*, tienen más del 80% de su área total en la categoría inferior de huella humana. En el otro extremo hay siete ecorregiones que tienen la mayor proporción de su área en la categoría de huella humana alta.

El valor medio de la huella humana varió entre 0.52 y 4.74, y se encontraron amplias diferencias en los valores ecorregionales dentro de la mayor parte de los biomas (Tabla 2 y Figura 3). Solo el bioma *North American Deserts* tuvo la mayor parte de sus ecorregiones en la categoría de baja huella humana (0.53 para el *Chihuahuan Desert* y 0.57 para el *Sonoran Desert*).

El bioma *Mediterranean California* no tiene variación ecorregional debido a que solo contiene una ecorregión en México. El resto de los biomas mostraron variaciones marcadas en el promedio de huella humana de sus ecorregiones (Figura 3). Excepto por el *North American Deserts* y el *Mediterranean California* el resto de los biomas tuvieron al menos una ecorregión con valores medios de $HF > 3$.

Tabla 2. Ecorregiones de México ordenadas de acuerdo a su valor promedio de huella humana.

Ecorregiones	Biomás	HF promedio	Desv. est.	Asimetría	Tamaño promedio de parche	Área HF baja (%)
Baja-HF ecoregions						
<i>Western Sierra Madre</i>	<i>Temperate Sierras</i>	0.52	1.35	3.42	121	75
<i>Chihuahuan Desert</i>	<i>North American Deserts</i>	0.53	1.53	3.46	268	82
<i>Sonoran Desert</i>	<i>North American Deserts</i>	0.57	1.58	3.32	176	81
<i>Sierra and Plains of El Cabo</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	0.64	1.44	3.24	104	68
Media-HF ecoregions						
<i>Plain and Hills of the Yucatan Peninsula</i>	<i>Tropical Humid Forests</i>	1.02	1.83	1.93	76	64
<i>Mediterranean California</i>	<i>Mediterranean California</i>	1.09	2.30	2.30	116	71
<i>Southern Sierra Madre</i>	<i>Temperate Sierras</i>	1.12	1.97	1.94	42	58
<i>Altiplano Potosino</i>	<i>North American Deserts</i>	1.32	2.21	1.71	54	60
<i>Eastern Sierra Madre</i>	<i>Temperate Sierras</i>	1.40	2.19	1.57	37	54
<i>Northwestern Plain of the Yucatan Peninsula</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	1.66	2.48	1.57	29	54
<i>Central American Sierra Madre and Chiapas Highlands</i>	<i>Temperate Sierras</i>	1.68	2.31	1.29	22	44
<i>Western Sierra Madre Piedmont</i>	<i>Southern Semi-Arid Highlands</i>	1.79	2.70	1.23	54	58
<i>Western Pacific Coastal Plain, Hills and Canyons</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	1.91	2.74	1.15	40	52

<i>Tamaulipas-Texas Semi-Arid Plain</i>	<i>Great Plains</i>	2.01	2.44	1.03	25	42
<i>Western Pacific Plain and Hills</i>	<i>Tropical Humid Forests</i>	2.25	2.87	0.89	23	46
<i>Southern Mexican Pacific Coastal Plain and Hills</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	2.40	2.71	0.79	16	37
<i>Interior Depressions</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	2.58	2.83	0.70	17	35
Alta-HF ecoregions						
<i>Coastal Plain and Hills of Soconusco</i>	<i>Tropical Humid Forests</i>	3.54	2.91	-0.20	16	27
<i>Gulf of Mexico Humid Coastal Plains and Hills</i>	<i>Tropical Humid Forests</i>	3.58	2.69	-0.07	17	23
<i>Transversal Neo-Volcanic System</i>	<i>Temperate Sierras</i>	3.68	3.16	0.19	13	25
<i>Mexican High Plateau</i>	<i>Southern Semi-Arid Highlands</i>	3.92	3.01	-0.02	8	19
<i>Gulf of Mexico Dry Coastal Plains and Hills</i>	<i>Tropical Dry Forests</i>	3.97	2.64	-0.26	10	23
<i>Texas-Louisiana Coastal Plain</i>	<i>Great Plains</i>	4.45	3.08	-0.42	12	22
<i>Sierra Los Tuxtlas</i>	<i>Tropical Humid Forests</i>	4.74	2.02	-0.77	7	5

La distribución de las propiedades estadísticas de los valores de la huella humana a nivel bioma y ecorregional revelaron niveles similares y mostraron rasgos comúnmente observados en las variables “zero-bounded”. Es decir, por un lado la desviación estándar de la *HF* tiende a aumentar con la media de la *HF* hasta que logra la asíntota cuando el valor medio alcanza el valor de 3 (Figura 4a). De manera similar la asimetría de la distribución fue muy alta en las ecorregiones con baja *HF*, y se aproximó al cero con los valores de huella humana más altos (Figura 4b). Es decir, las regiones con valores bajos de *HF* presentaron una distribución en forma de *J*, con una dominancia de zonas con bajos niveles de *HF*, pero con algunos parches con niveles altos relacionados con las ciudades o valles agrícolas. En contraste, cuando los valores medios de huella humana aumentan la distribución tiende a mostrar una forma de campana (asimetría = 0), con áreas de valores bajos y altos distribuidos homogéneamente alrededor de la media. Esto implica que incluso en las regiones que muestran los valores altos de *HF* la cola a la izquierda de la media alberga algunas áreas remanentes con baja huella humana.

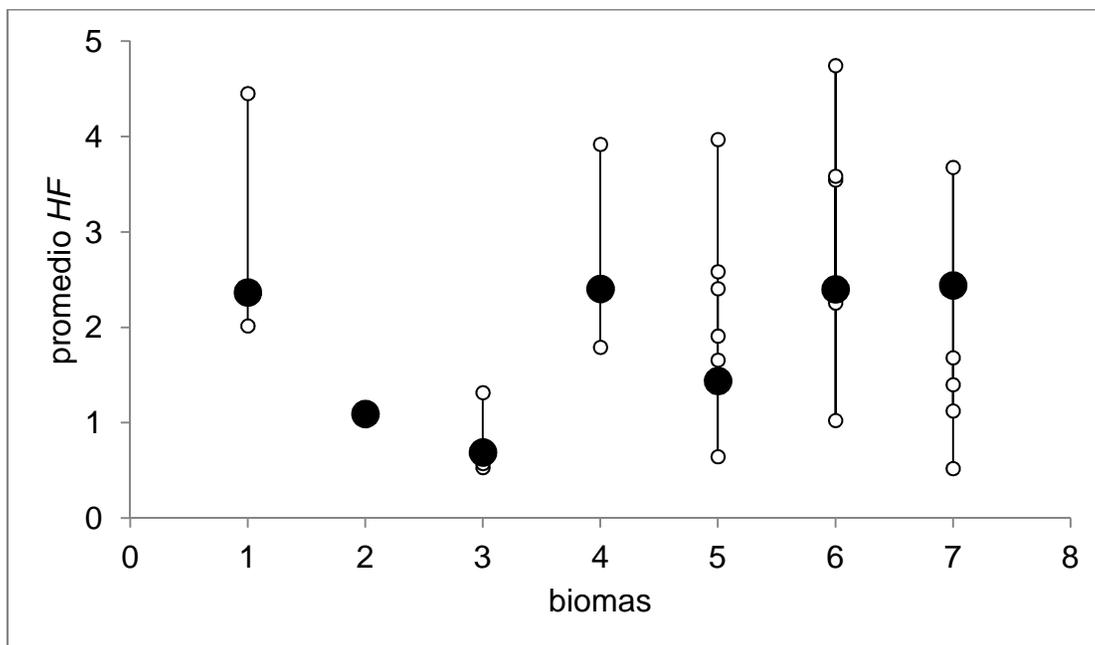


Figura 3. Huella ecorregional anidada en biomas. Se encontraron grandes diferencias en los valores ecorregionales (puntos blancos) dentro de la mayor parte de los biomas (puntos negros). Biomas: Great Plains (1), Mediterranean California (2), North American Deserts (3), Southern Semi-Arid Highlands (4), Temperate Sierras (5), Tropical Dry Forest (6) y Tropical Humid Forest (7).

Las ecorregiones con el parche promedio más grande (más de 100 km²) en categoría de baja huella humana ($HF = 0$), son *Chihuahuan* y *Sonoran Deserts*, *Western Sierra Madre*, *Mediterranean California* y *Sierras and Plains of El Cabo*. Se encontró una relación negativa entre el tamaño promedio de los parches con categoría de HF baja y la media de la huella humana (Figura 4c). Las ecorregiones en la categoría baja de HF albergan la mayor área (>70%) y los parches más grandes continuos con $HF = 0$. En contraste, el parche promedio con $HF = 0$ dentro de las ecorregiones con HF alto son menos del 30% y menores a 20 km² respectivamente.

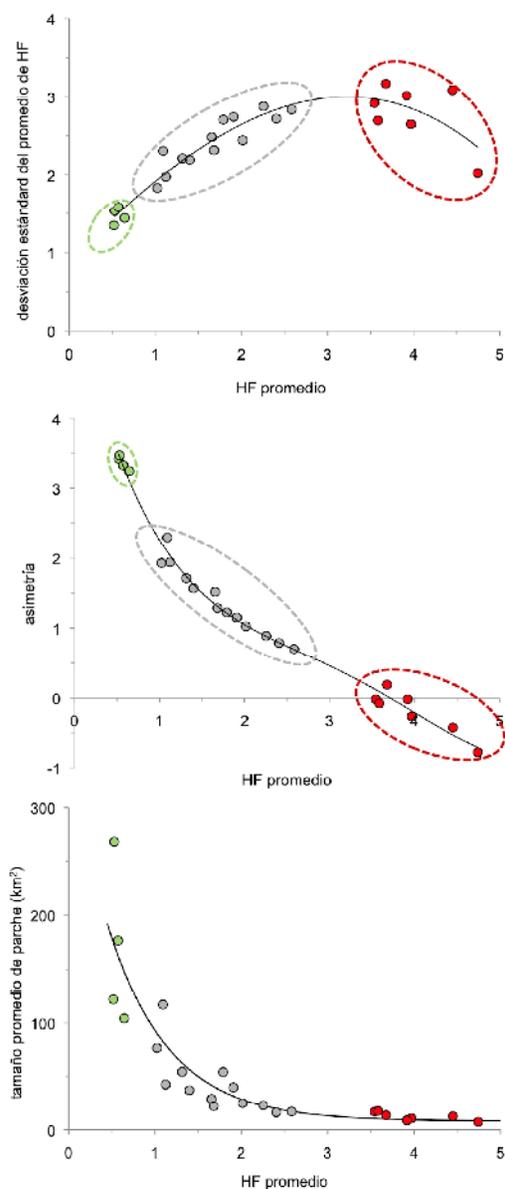


Figura 4. Propiedades estadísticas de la huella humana por ecorregiones. (a) La relación entre el promedio de la huella humana de las 24 ecorregiones y la desviación estándar de sus valores de huella humana ($R^2 = 0.98$; $P < 0.0001$). (b) La relación de entre la huella humana de cada ecorregión y la asimetría de la distribución de los valores de huella humana ($R^2 = 0.87$; $P < 0.00001$). (c) La relación entre el promedio de la huella humana y el tamaño promedio de parche con huella humana baja en cada ecorregión ($R^2 = 0.84$, $P < 0.00001$). En todos los casos el ajuste se generó usando regresiones polinomiales.

Al descomponer la varianza de la huella humana entre los efectos de los biomas y de las ecorregiones anidadas dentro de los biomas, encontramos que

una significativa cantidad de la variación de los valores de la *HF* es responsabilidad de las diferencias marcadas entre los biomas y entre las ecorregiones dentro de los biomas ($P < 0.0001$ para ambos factores, ver Tabla 3). La varianza media de los dos niveles no varió significativamente entre ellos ($F_{6,18} = 1.40$, $P = 0.27$), lo que indica que la variación entre las ecorregiones dentro de los biomas es tan grande como la variación entre biomas.

Tabla 3. ANOVA. Descomposición de la variación total del mapa en (a) variación entre-biomas, (b) variación entre ecorregiones (anidadas dentro de los biomas), y (c) el error residual o la variación dentro de las ecorregiones.

Origen	Suma cuadrados	g.l.	Media cuadrática	F	P
a. Bioma	474,728	6	79,121	16,484	<0.0001
b. Ecorregiones dentro de biomas	1,013,680	18	56,316	11,732	<0.0001
c. Error	4,156,516	865,960	4.80		
Total	5,644,924	865,984			

Finalmente, encontramos siete ecorregiones que albergaron asentamientos prehispánicos densos que corresponden a áreas ocupadas antes de la llegada de los españoles a México (Figura 5). Dos de ellas se localizan en la península de Yucatán (*Plains and Hills of the Yucatan Peninsula* y *Northwestern Plain of the Yucatan Peninsula*) y cinco ecorregiones en la parte central y del sur de México (*Interior Depressions*, *Gulf of Mexico Humid Coastal Plains and Hills*, *Transversal Neo-Volcanic System*, *Mexican High Plateau* y *Sierra Los Tuxtlas*). A la lista se añadió *Coastal Plain and Hills of Soconusco*, que aunque no presentó gran densidad en asentamientos prehispánicos era una región de extrema importancia como zona productiva de cacao antes de la llegada de los españoles. Se encontró un valor medio de *HF* en las ecorregiones del centro de México (3.67, s.e. ± 0.28) superior al de la península de Yucatán (1.34, s.e. ± 0.32) y del resto de México

(1.73, s.e. \pm 0.29). El centro y sureste de México difirieron significativamente de las otras dos regiones ($t = 5.5$, $P < 0.005$, y $t = 4.8$, $P < 0.003$, respectivamente), pero la huella humana en Yucatán no difirió del resto de México ($t = 0.38$, $P = 0.76$; Figura 5).

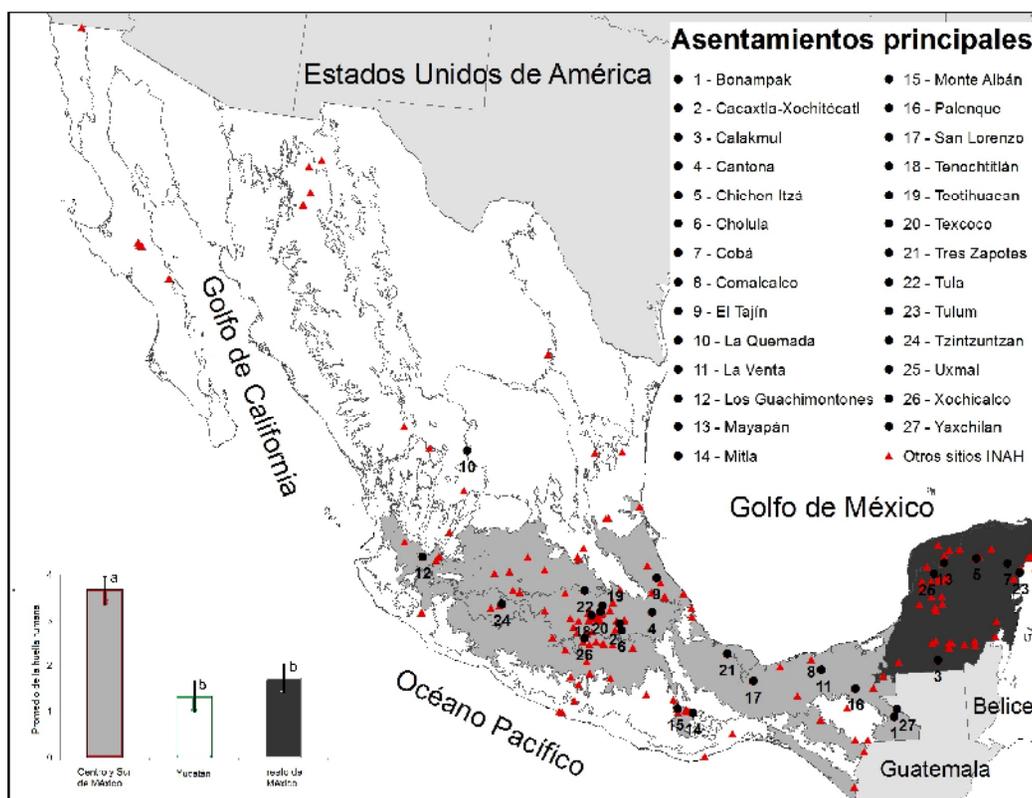


Figura 5. Distribución de los asentamientos prehispánicos en México. Sitios prehispánicos basados en el INAH (<http://www.geoportal.inah.gob.mx/>) y los principales asentamientos basados en Sharer (1994), Whitmore y Turner (2001) y Kellog (2011). La gráfica de barras: promedio de la huella humana para Centro y Sur de México, la península de Yucatán y el resto de México. Las diferentes letras indican los valores que difieren significativamente ($P < 0.05$).

La huella humana en las áreas naturales protegidas

En el 2010 la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas de México administraba 174 áreas naturales protegidas y 75 de ellas con un área superior a

100 km², que suman en total 194,540 km² (76% del área protegida total en 2010). Un total de 38 ANP están presentes en más de dos ecorregiones y dos de éstas (Sierra Gorda, CADNR043) están repartidas entre 5 y 6 ecorregiones, respectivamente. El porcentaje de área protegida por ecorregión varía entre el 0.2% en el Altiplano Potosino y el 38% en *Sierra Los Tuxtlas* (Tabla 4).

Tabla 4. Área protegida total por ecorregión.

Bioma	Ecorregión	Numero de ANP*	Área total ANP* (km²)	Área (km²)	Área protegida / ecorregión (%)
<i>North American Deserts</i>	<i>Altiplano Potosino</i>	3	276	98,917	0.28
<i>Temperate Sierras</i>	<i>Central American Sierra Madre and Chiapas Highlanlands</i>	5	3,845	27,758	13.85
<i>North American Deserts</i>	<i>Chihuahuan Desert</i>	9	24,890	247,466	10.06
<i>Tropical Humid Forests</i>	<i>Coastal Plain and Hills of Soconusco</i>	4	2,049	11,053	18.54
<i>Temperate Sierras</i>	<i>Eastern Sierra Madre</i>	8	11,177	52,406	21.33
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Gulf of Mexico Dry Coastal Plains and Hills</i>	3	876	43,137	2.03
<i>Tropical Humid Forests</i>	<i>Gulf of Mexico Humid Coastal Plains and Hills</i>	10	11,697	131,426	8.90
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Interior Depressions</i>	10	7,134	89,678	7.96
<i>Mediterranean California</i>	<i>Mediterranean California</i>	2	1,985	24,793	8.01
<i>Southern Semi-Arid Highlands</i>	<i>Mexican High Plateau</i>	5	234	65,711	0.36
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Northwestern Plain of the Yucatan Peninsula</i>	4	1,856	12,347	15.03
<i>Tropical Humid Forests</i>	<i>Plain and Hills of the Yucatan Peninsula</i>	7	13,953	119,992	11.63
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Sierra and Plains of El Cabo</i>	1	1,125	8,158	13.79
<i>Tropical Humid Forests</i>	<i>Sierra Los Tuxtlas</i>	1	1,543	4,080	37.83
<i>North American Deserts</i>	<i>Sonoran Desert</i>	6	56,554	194,797	29.03
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Southern Mexican Pacific Coastal Plain and Hills</i>	4	403	56,348	0.72
<i>Temperate Sierras</i>	<i>Southern Sierra Madre</i>	5	4,609	93,455	4.93
<i>Great Plains</i>	<i>Tamaulipas-Texas Semi-Arid Plain</i>	3	3,627	92,150	3.94
<i>Great Plains</i>	<i>Texas-Louisiana Coastal Plain</i>	1	2,915	15,498	18.81
<i>Temperate Sierras</i>	<i>Transversal Neo-Volcanic System</i>	18	7,593	83,459	9.10
<i>Tropical Dry Forests</i>	<i>Western Pacific Coastal Plain, Hills</i>	5	4,733	124,921	3.79

<i>and Canyons</i>					
<i>Tropical Humid Forests</i>	<i>Western Pacific Plain and Hills</i>	2	2,544	11,732	21.68
<i>Temperate Sierras</i>	<i>Western Sierra Madre</i>	6	24,104	176,647	13.65
<i>Southern Semi-Arid Highlands</i>	<i>Western Sierra Madre Piedmont</i>	6	4,819	162,535	2.96
Total		128	194,540	1,948,464	9.98

La huella humana promedio de las ANP* es mayoritariamente inferior al de su ecorregión (Figura 7). Un total de 19 ANP* tuvieron una extensión insuficiente ($< 32 \text{ km}^2$) para realizar pruebas estadísticas y por lo tanto fueron desechadas. De las 109 restantes un total de 40 ANP* (37%, $14,703 \text{ km}^2$, 7.5% de la extensión total) tuvieron un $IC = 0$, ya que no mostraron diferencia significativa en su HF respecto a su ecorregión. Sólo dos ANP* presentaron un IC negativo, esto es su valor de HF fue significativamente superior a su ecorregión (753 km^2 , 0.38% del área) (fragmento del Cañón del Río Blanco en Sierra Madre ($IC = 3.01$) y Zona Protectora Forestal Vedada La Cuenca del Río Necaxa en Eastern Sierra Madre ($IC = 2.08$)). Un total de 67 ANP* ($178,891 \text{ km}^2$, 92% del área total) presentaron un IC positivo significativo estadísticamente, 8 de ellas en valores bajos ($IC = 0.25 - 0.50$) y 59 en valores altos ($IC = 0.51 - 1$).

La distribución espacial de las ANP* con índice de conservación positivo muestra que se localizan principalmente en el norte y sureste del país en ecorregiones con niveles bajos y medios de huella humana. Las ANP* con IC negativo y valores igual cero están asociados principalmente a las ecorregiones del centro del país y sus fronteras que constituyen las regiones con los valores más altos de HF (Figura 8).

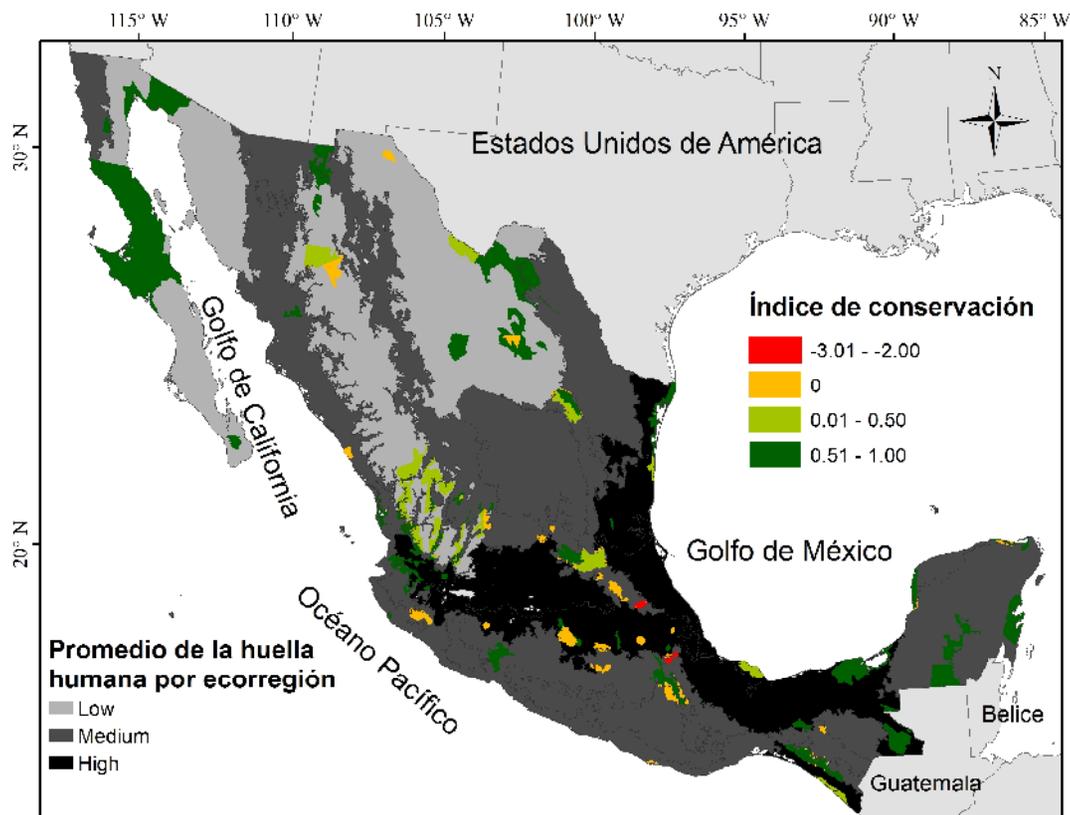


Figura 6. Índice de conservación de las ANP* en relación al promedio de huella humana de su ecorregión.

DISCUSIÓN

A pesar de la larga historia de uso del territorio en México todavía hay una gran proporción de superficie que parece mantener una cobertura vegetal que ha recibido baja transformación por las actividades humanas ($HF = 0$), mayoritariamente en los desiertos del norte y en la zona de la Sierra Madre Occidental. El clima árido de la mayor parte del norte del país, la topografía escarpada y la inaccesibilidad de las sierras pueden estar explicando la existencia de grandes proporciones de éstas áreas con aparente mínima huella humana. La

gran diferencia en la huella humana entre los biomas apoya la hipótesis de que la geografía física es un factor predominante que controla la transformación antrópica de los ecosistemas. Los biomas están definidos como grandes unidades con patrones generales de geografía física, clima, y de vegetación similares (Bailey, 2005), por lo tanto, los biomas que están menos transformados por las actividades humanas deberían corresponder a grandes regiones donde la transformación de la superficie terrestre es difícil ecológicamente o tienen limitada productividad, como sierras escarpadas o desiertos.

A escala ecorregional los valores más altos de huella humana se observaron a lo largo del corredor costero del Golfo de México, desde la ecorregión *Texas Coastal Plain* en la frontera con los Estados Unidos de América hasta la ecorregión sureña de *Humid Coastal Plains* en Tabasco. De este corredor costero en dirección este-oeste se extiende una franja de ecorregiones con *HF* alto a lo largo de las sierras de la ecorregión *Transversal Neovolcanic System* y las tierras altas del *Mexican High Plateau*. Finalmente, un área con huella humana alta se localiza a lo largo de la costa del Pacífico del sur de México en la ecorregión *Coastal Plains of the Soconusco*, en Chiapas. Las ecorregiones dentro de los biomas comparten características similares de geografía física, clima y fisionomía de plantas; las diferencias entre ellas se encuentran a escala de fisiografía local, historia biogeográfica, diversidad y endemismo. Sin embargo, en el ANOVA encontramos que la variación entre ecorregiones dentro del mismo bioma es tan importante como entre biomas, un hecho que apoya nuestra segunda hipótesis, es decir, a escala de bioma los legados históricos juegan un papel importante en la transformación de la superficie terrestre. Un ejemplo se encuentra en el bioma *Tropical Humid Forest* en donde la ecorregión *Plains and Hills of the Yucatan Peninsula* tiene un *HF* promedio de 1.02 mientras que la *Sierra Los Tuxtlas*, una de las regiones más intensamente deforestadas en México, tiene un valor promedio de huella humana de 4.74 (el valor más alto entre todas las ecorregiones de México, Tabla 2). Las dos áreas tienen clima y vegetación similar, la principal diferencia entre ellas es su historia de uso. En

Yucatán los bosques se despoblaron después del colapso de la civilización maya y mantuvieron una baja población desde entonces; en cambio, la región de Los Tuxtlas sufrió una deforestación intensa en el último siglo como resultado de la demanda de sitios de pastoreo y espacio para la agricultura tropical (Dirzo y García, 1992). De manera similar, en el bioma *Tropical Dry Forest* las *Sierras and Plains of El Cabo* mantienen uno de los valores más bajos de la huella humana ($HF = 0.64$) mientras que el *Gulf of Mexico Dry Coastal Plains and Hills* (también conocido como el Bosque Seco Tamaulipeco) tiene uno de los valores más altos ($HF = 3.97$). Estas diferencias tan marcadas entre ecorregiones que son climática y geográficamente similares se observan a lo largo del resto de los biomas en todo México.

El desarrollo acelerado de México durante el siglo XX explica parcialmente este patrón: las planicies costeras del Golfo de México albergan dos de las principales áreas industriales en el país (Monterrey en el norte y Coahuila de Zaragoza en el sur), los puertos más grandes de México, la industria del petróleo más antigua y una gran parte de la tierra más fértil y productiva del país. El transecto de valles y cuencas que corre paralelo al Eje Neovolcánico Transversal alberga una cadena de ciudades de gran tamaño: Puebla, México, Toluca, Querétaro, León y Guanajuato entre otras. Las costas agrícolas costeras de Sonora, Sinaloa y Nayarit (cuna de la revolución verde en México) contiene algunas de las áreas de mayor producción de granos. Sin embargo, una interpretación de éstas áreas con niveles altos de huella humana y de su patrón espacial basado solamente en una visión contemporánea puede distraer de las causas potenciales del patrón espacial de uso del país.

Se estima que la población total antes de la conquista de lo que ahora es México era de alrededor de 25 millones de personas (Borah and Cook, 1969). Cuando los españoles llegaron a Mesoamérica encontraron un territorio densamente poblado y un paisaje altamente transformado (Denevan, 1992) en donde vivían entre 10 - 25 millones de personas (Figura 6). Grandes y majestuosas civilizaciones habían crecido y colapsado durante milenios en el

centro de México, y habían dejado su huella ambiental en términos no solo de grandes asentamientos humanos también en terreno desmontado, paisajes de terrazas, sistemas de irrigación y bosques transformados (Whitmore y Turner, 2001). En el siglo siguiente a la conquista española la población se redujo hasta alrededor de un millón de personas, que constituye uno de los descensos de población más dramáticos de la historia (Whitmore, 1991). Las causas fueron el colapso de la economía local, el sistema de encomienda pero sobre todo las nuevas enfermedades importadas por los españoles (Figura 6) (Whitmore, 1991). La tragedia demográfica afectó seriamente la agricultura y los usos de suelo en México. Los sistemas de cultivo no se pudieron mantener con las pérdidas masivas de trabajadores (Borah y Cook, 1969) y el abandono de éstos paisajes cultivados facilitó la apropiación de tierras por parte de los nuevos conquistadores y el desarrollo del sistema de haciendas o de grandes regiones manejadas por la nueva clase gobernante (Van Young, 1983).

A pesar de que los cultivos y las tecnologías cambiaron bajo el dominio de los españoles, la ocupación del territorio siguió en gran medida los patrones prehispánicos de uso del suelo. La ganadería bovina fue introducida en las costas del Golfo de México y se quemaron áreas de bosque tropical, humedales y huertos frutales tropicales para propiciar el crecimiento de pastos y generar pastizales para el ganado (Melville, 1994). Cultivos de caña de azúcar, cacao, algodón y tabaco también fueron introducidos en las costas del Golfo de México, todos estos cultivos del Nuevo Mundo comenzaron a ser demandados en Europa durante la

Colonia Española. Cultivos tropicales similares se desarrollaron en la región del Soconusco en Chiapas, cerca de la frontera con Guatemala. En ésta región las fértiles tierras cerca de las costas habían sido un sitio de producción de cacao importante durante la época prehispánica (Rosenswig, 2008), pero durante los siglos XIX y XX creció explosivamente su área productiva al utilizar las pendientes montañosas para el cultivo de cacao y café (Gasco, 1996).

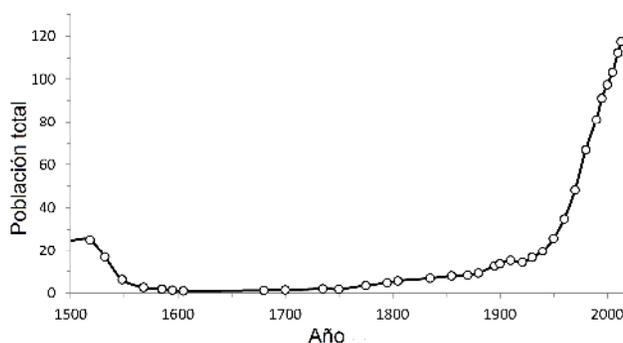


Figura 7. Población en México entre 1521 y 2010. Datos compilados de Borah y Cook (1969), McCaa(2000), Benítez Zenteno, (1961); y censos de población oficiales disponibles en www.inegi.gob.mx.

En el centro de México y la costa del Golfo de México hay una coincidencia remarcable entre las áreas de alta huella humana y los sitios con distribución histórica de asentamientos y civilizaciones prehispánicas. Como regla general, las áreas más transformadas se localizan en la costa del Golfo de México y siguen en dirección este – oeste con una cadena de ciudades a lo largo de las montañas centrales. Este patrón presenta una coincidencia espacial con los grandes asentamientos prehispánicos existentes al momento de la llegada de los españoles a México a inicios del siglo XVI.

En contraste, no se encontró una asociación espacial significativa entre el valor de la huella humana en cada ecorregión y el número de asentamientos prehispánicos en la península de Yucatán. Esta baja huella humana de la civilización maya ha sido analizada en detalle y se ha demostrado que muchos de los bosques en la región maya son realmente un mosaico remanente de antiguos huertos (Flores *et al.*, 1987). Las áreas silvestres consideradas naturales de la región maya están en gran parte formadas por la regeneración del bosque sobre los remanentes de los huertos y áreas de cultivos abandonados. Es decir, lo que los españoles encontraron fue un paisaje fruto de la recolonización de bosques después del colapso maya.

Finalmente, en el árido norte del país un proceso importante de cambio de uso de suelo ocurrió principalmente durante el siglo XX para promover el desarrollo de nuevos distritos de irrigación en las fértiles planicies aluviales de los afluentes de las zonas áridas. A partir de la década de 1930, una vez finalizada la Revolución Mexicana, se emprendieron grandes proyectos de irrigación, en parte para crear nuevos trabajos y abrir nuevas fronteras agrícolas. La huella de estos proyectos masivos es claramente visible en la cuenca del Río Nazas en el corazón del Desierto Chihuahuense, a lo largo de la costa de Sonora y Sinaloa en las planicies bajas de los ríos Baluarte, Fuerte, Mayo y Yaqui, en el Valle de Mexicali en las planicies del delta del Río Colorado y finalmente en el Valle de Santo Domingo en Baja California Sur. Fue básicamente la tecnología moderna (ej., pozos profundos, ríos represados, electrificación, refrigeración y aire acondicionado) la que logró la colonización de esas áreas, junto con las ciudades industriales de las ecorregiones norteñas como Monterrey, Monclova, Torreón, Juárez y Tijuana, estas áreas de alta huella humana son el resultado de la expansión acelerada durante el siglo XX de los esfuerzos de desarrollo la región árida del país.

CONCLUSIONES

La extensión espacial de la huella humana en México a nivel bioma es el resultado de las limitaciones ambientales impuestas al desarrollo humano a través de la geografía física, sin embargo, a nivel ecoregional se observa una significativa influencia de los legados históricos de las civilizaciones pasadas, sus colapsos de población y la explosión demográfica del siglo XX.

A lo largo del país, pero principalmente en el centro, la distribución espacial actual de los caminos y carreteras, las zonas agrícolas y las ciudades son en gran medida la proyección en el tiempo de las civilizaciones, tecnología e interacciones sociales del pasado.

El escenario geográfico de la huella humana de México mostrado en el presente trabajo cuantifica detalladamente patrones que frecuentemente son

conocidos o sospechados pero que no habían sido objeto de análisis a nivel de todo el país, ni analizados estadísticamente para explorar hipótesis sobre factores que condicionaron su conformación. Por ejemplo, este modelo localizó grandes extensiones que han sido severamente transformadas por el ser humano pero que mantienen baja densidad poblacional, como las zonas agrícolas industriales en las costas del Desierto Sonorense. De esta manera el modelo de la huella humana puede ser una herramienta útil y mucho más poderosa para entender transformaciones al medio ambiente a gran escala que la densidad poblacional, la distribución de las ciudades o los análisis de uso de suelo y vegetación en solitario.

El algoritmo de la huella humana fue capaz de identificar con precisión el tamaño y la localización de los parches con bajos niveles de transformación antrópica, la mayor parte de estos parches se localiza en la áridas ecorregiones del noroeste de México, en donde durante las últimas décadas el Gobierno Federal ha creado grandes áreas naturales protegidas. Las ecorregiones con mayor impacto antropogénico se localizan en la región central y sur del país, sin embargo, parches con niveles bajos de huella humana se encuentran también distribuidos a lo largo de esas ecorregiones.

Finalmente, a pesar de que en los mapas actuales de uso de suelo gran parte de las regiones áridas con huella humana está clasificada con cobertura vegetal nativa, estos ecosistemas han sido utilizados durante siglos y muchos han sufrido intensos cambios biológicos (Challenger, 1998; SEMARNAT, 2013). Por ejemplo, la introducción de ganado en el desierto Chihuahuense y Sonorense ocasionó el crecimiento invasivo de especies nativas del género *Opuntia*, causando un cambio en la estructura dominante de las comunidades de plantas nativas (Janzen, 1986), pero generando un paisaje que se podría confundir como silvestre. Los bajos valores de huella humana que se encontraron en estas ecorregiones contrastan con las estadísticas oficiales de degradación de zonas de pastoreo (SEMARNAT, 2013), en donde más del 50% del área que se categoriza en mapas de uso de suelo y vegetación con cobertura vegetal nativa en realidad

está reportado con problemas de erosión, sobrepastoreo o impactado por la vegetación inducida para el pastoreo (SEMARNAT, 2013). Estos datos realzan el gran impacto que tuvo la introducción de ganado europeo y como su impacto en las zonas áridas se puede esconder detrás de un paisaje con una aparente permanencia de la vegetación nativa. Por lo tanto, el método que nosotros usamos y el mapa resultante pueden estar escondiendo la magnitud de la transformación antrópica en las categorías de baja huella humana. Estos impactos en ecosistemas nativos y en la biodiversidad necesitan ser considerados más detalladamente en el futuro para poder presentar y entender con mas precisión la influencia humana en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas mexicanos.

Las ANP* mantienen en su mayoría áreas con bajos niveles de *HF*. Sin embargo, las ANP* que se localizan en las ecorregiones con mayor huella humana o en sus fronteras son precisamente aquellas que no difieren en sus valores de huella humana con respecto a las ecorregiones en las que se hospedan. Esto nos puede estar indicando que los niveles de transformación antrópica traspasa incluso las fronteras de las áreas destinadas a la conservación de la naturaleza.

La aproximación que usamos en este análisis puede informar y guiar esfuerzos para la planificación de proyectos de conservación a escala nacional. Por ejemplo, el conocimiento sobre la intensidad de uso del territorio en México identifica grandes regiones con huella humana baja en donde estudios mas detallados podrían ayudar a perfeccionar esquemas de conservación y manejo.

LITERATURA CITADA

- Acuña-Soto, R., D.W. Stahle, M.K. Cleaveland, M.D. Therrell. 2002. Megadrought and megadeath in 16th Century Mexico. *Emerg Infect Dis.* 8: 360-362.
- Bailey, R.G. 2005. Identifying ecoregion boundaries. *Environ Manage.* 34 Suppl 1:S14-S26.
- Balmford, A., N. Leader-Williams, J.B. Green. 1995. Parks or arks: Where to conserve large threatened mammals. *Biodivers Conserv* 4:595-607.
- Borah, W., S.F. Cook. 1969. Conquest and population: A demographic approach to mexican history. *Proc Am Philos Soc.* 113:177-183.
- Bragina, E., V.C. Radeloff, M. Baumann, K. Wendland, T. Kuemmerle, A.M. Pidgeon. 2015. Effectiveness of protected areas in the Western Caucasus before and after the transition to postsocialism. *Biol Conserv* 184:456-464.
- Brandt, J.S., V. Butsic, B. Schwab, T. Kuemmerle, V.C. Radeloff. 2015. The relative effectiveness of protected areas, a logging ban and sacred areas for old growth forest protection in southwest China. *Biol Conserv* 181:1-8
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO, UNAM, Agrupación Sierra Madre S.C. Mexico, D.F. 847 p.
- Chape S, Harrison J, Spalding M, Lysenko I (2005) Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Biol Sci* 360:443–455.
- Commission for Environmental Cooperation Working Group. 1997. Ecological regions of North America. Toward a common perspective. Commission for Environmental Cooperation, Montreal, 71p.
- Cook, S. 1947. The interrelation of population, food supply, and building in pre-conquest central Mexico. *Am Antiq.* 13:45-52.
- de Sherbinin, A., M. Freudenberger. 1998. Migration to protected areas and buffer zones: can we stem the tide? *Parks* 8:38-53.

- Denevan, W.M. 1992. The Pristine Myth: The Landscape of the Americas in 1492. *Ann Assoc Am Geog.* 82:369-385.
- Dietz, T., E.A. Rosa, R. York. 2007. Driving the human ecological footprint. *Front Ecol Environ.* 5:13-18.
- Dirzo, R., M.C. García. 1992. Rates of Deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast Mexico. *Conserv Biol* 6:84-90.
- Dudley, N., B. Gujja, B. Jackson, J.P. Jeanrenaud, G. Ovedia, A. Phillips, P. Rosabel, S. Stolton, S. Wells. 1999. Challenges for protected areas in the 21st century. En: Stolton, S., Dudley, N., (eds.) *Partnerships for protection and management for protected areas.* Earthscan, WWF, IUCN London, pp. 3-12.
- Dupouey, J., E. Dambrine, J. Laffite, C. Moares. 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83:2978-2984.
- Ellis, E.C., K. Klein Goldewijk, S. Siebert, D. Lightman, Ramankutty N. 2020. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Glob Ecol Biogeogr.* 19:589-606.
- Ellis, E.C. 2011. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci.* 369:1010-1035.
- Ervin, J. 2003a. Protected area assessments in perspective. *Bioscience* 53:819-822.
- Ervin, J. 2003b. Rapid assessment of protected area management effectiveness in four countries. *Bioscience* 53:833-841.
- ESRI. 2004. *Mexico Roads.* Escala 1:250,000.
- Figueroa, F., V. Sánchez-Cordero. 2008. Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in México. *Biodivers Conserv.* 17:3223-3240.
- Flores, J.S., A. Gomez-Pompa, V. Sosa. 1987. The pet kot: A manmade tropical forest of the Maya. *Interciencia* 12:10-15.
- Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, Carpenter SR. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Forman, R., Alexander, L. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annu Rev Ecol Syst.* 29: 207–231.

- Forman, R.T.T. 2000. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conserv Biol.* 14:31-35.
- Gasco, J. 1996. Cacao and Economic Inequality in Colonial Soconusco, Chiapas, Mexico. *J Anthropol Res.* 52:385-409.
- Gomez-Pompa, A., Kaus, A. 1992. Taming the wilderness myth. *BioScience* 42:271-279.
- González-Abraham, C.E., V.C. Radeloff, T.J. Hawbaker, R.B. Hammer, S.I. Stewart, M.K. Clayton. 2007. Patterns of houses and habitat loss from 1937 to 1999 in northern Wisconsin, USA. *Ecol Appl.* 17:2011-2023.
- Haines, A.M., M. Leu, L.K. Svancara, J.M. Scott, K.P. Reese. 2008. A theoretical approach to using human footprint data to assess landscape level conservation efforts. *Conserv Lett.* 1:165-172.
- Hannah, L., J. Carr, A. Lanerani. 1995. Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global data set. *Biodivers Conserv.* 4:128-155.
- INEGI. 2005. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000 Serie III. Aguascalientes
- Instituto Mexicano del Transporte. 2001. Red de Carreteras. Escala 1:1. Mexico, D.F.
- IUCN. 2005. Benefits beyond boundaries. Proceedings of the Vth IUCN World Parks Congress. The World Conservation Union, Durban. Pp. 250
- Janzen, D.H. 1986. Chihuahuan Desert nopaleras: Defaunated big mammal vegetation. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 17:595-636.
- Kellogg, S. 2011. The Gods Depart: Riddles of the rise, fall, and regeneration of Mesoamerica's indigenous societies. En: Beezley, W.H. (ed.) *A companion to Mexican history and culture.* Oxford: Wiley-Blackwell. pp. 410.
- Leu, M., S.E. Hanser, S.T. Knick. 2008. The human footprint in the West: a large-scale analysis of anthropogenic impacts. *Ecol Appl.* 18:1119-1139.
- Liu, J., M. Linderman, Z. Ouyang, L. An, J. Yang, H. Zhang. 2001. Ecological degradation in protected areas: The case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science* 292:98-101.
- Machado, A. 2004. An index of naturalness. *Nat Conserv* 12:95-110.

- Mas, J. 2005. Assessing protected area effectiveness using surrounding (buffer) areas environmentally similar to the target area. *Environmental Monitoring and Assessment* 105:69-80.
- McCaa, R. 2000. The peopling of Mexico from origins to revolution. En: Steckel, R., Haines, M. (eds.). *The population history of North America.*: Cambridge University Press, New York. pp 241-296.
- Melville, E.G.K. 1994. *A plague of sheep: Environmental consequences of the conquest of Mexico.* Cambridge University Press, Cambridge, pp. 220.
- Meyer, W., B. Turner. 1992. Human population growth and global land-use/ cover change. *Annu Rev Ecol Syst.* 23:39-61.
- Mittermeier, R.A., P. Robles-Gil, C.G. Mittermeier. 1997. Megadiversity: Earth's biologically wealthiest nations.: Conservation International & Cemex, Washington.,pp. 501
- ONU-HABITAT. 2011. *Estado de las ciudades de México 2011.* Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. México, D.F.
- Perring, M., Ellis, E. 2013. The extent of novel ecosystems: Long in time and broad in space. En: Hobbs, R.J., Higgs, E.S., Hall, C. (eds.). *Novel ecosystems: Intervening in the new ecological world order.*, Wiley-Blackwell , Chichester,pp. 66–80.
- Phillips, A. 2000. Caring for the assets—the effectiveness of protected area management. En: Rana, D., L. Edelman (eds.) *The Design and Management of Forest Protected Areas.* Conference Proceedings for Beyond the Trees Conference, 8–11 May 2000, Bangkok, Thailand. World Wide Fund for Nature, Gland Pp 189-204.
- Pressey, R.L., G.L. Wish, T.W. Barret, M.E. Watts. 2002. Effectiveness of protected areas in north-eastern New South Wales: recent trends in six measures. *Biological Conservation* 106:57-69.
- Reid, W., H. Mooney, A. Cropper. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis.* Millenium Ecosystem Assessment.: Island Press, Washington, D.C. ,917.
- Rosenswig, R.M. 2008. Prehispanic Settlement in the Cuauhtémoc Region of the Soconusco, Chiapas, Mexico. *Journal of Field Archaeology* 33:389-411.

- Rosete Vergés, F.A. 2008. Modelos predictivos de cambio de uso del suelo en la península de Baja California, Tesis de Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 269p.
- Rosete Vergés, F.A., J.L. Pérez Damián, G. Bocco. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 67: 39-58.
- Sanders, W.T. 1991. The population of Central Mexican Symbiotic Region, the Basin of Mexico, and the Teotihuacán Valley in the Sixteenth Century. En: Denevan, W.M. (ed.). *The Native Population of the Americas in 1492.*: University of Wisconsin Press, Madison, pp. 85–150.
- Sanderson, E.W., M. Jaiteh, M.A. Levy, K.H. Redford, A.V. Wannebo, G. Woolmer. 2002. The human footprint and the last of the wild. *BioScience* 52: 891-904.
- SEMARNAT. 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Mexico, D.F. 362.
- Sharer, R. 1994. *The ancient Maya. Fifth Edition.* Stanford University Press, Stanford, 931.
- Small, C., Nicholls, R. 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *J Coast Res.* 19:584-599.
- Theobald, D.M. 2013. A general model to quantify ecological integrity for landscape assessments and US application. *Landsc Ecol.* 28:1859-1874.
- Therrell, M.D., D.W. Stahle, J.V. Díaz, E.H.C. Oviedo, M.K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474–2001. *Clim Change.* 74:493-504.
- Thoisy, B., C. Richard-Hansen, B. Goguillon, P. Joubert, J. Obstancias, P. Winterton. 2010. Rapid evaluation of threats to biodiversity: Human footprint score and large vertebrate species responses in French Guiana. *Biodivers Conserv.* 19:1567-1584.
- Turner II, B.L., K.W. Butzer. 1992. The Columbian encounter and land-use change. *Environment.* 34: 16-20, 37-44.
- Van Young, E. 1983. Mexican rural history since Chevalier: The historiography of the colonial hacienda. *Lat Am Res Rev.* 18:5-61.

- Vandam, R., E. Kaptijn, B. Vanschoenwinkel. 2013. Disentangling the spatio-environmental drivers of human settlement: An eigenvector based variation decomposition. *PLoS. One* 8: e67726.
- Whitmore, T.M., B.I. Turner. 1992. Landscapes of cultivation in Mesoamerica on the eve of the conquest. *Ann Assoc Am Geogr.* 82: 402–425.
- Whitmore, T.M., B.L. Turner II. 2001. *Cultivated landscapes of Middle America on the eve of conquest.* Oxford University Press, Oxford, 252.
- Whitmore, T.M. 1991. A Simulation of the Sixteenth-Century Population Collapse in the Basin of Mexico. *Ann Assoc Am Geog.* 81:464-487.
- Woolmer, G., S. Trombulak, J. Ray, P. Doran, M. Anderson, R.F. Baldwin. 2001. Rescaling the human footprint: A tool for conservation planning at an ecoregional scale. *Landsc Urban Plan.* 87:42-53.

ANEXO 1. Tabla de equivalencias de nombres de biomas

Nombre en Inglés	Nombre en Español
Temperate Sierras	Sierras Templadas
North American Deserts	Desiertos NorteAmericanos
Tropical Dry Forests	Selvas Cálido Secas
Tropical Humid Forests	Selvas Cálido Húmedas
Mediterranean California	California Mediterránea
Southern Semi-Arid Highlands	Elevaciones Semiáridas Meridionales
Great Plains	Grandes Planicies

ANEXO 2. Tabla de equivalencias de nombres de ecorregiones

Nombre en Inglés	Nombre en Español
Western Sierra Madre	Sierra Madre Occidental
Chihuahuan Desert	Desierto Chihuahuense
Sonoran Desert	Desierto Sonorense
Sierra and Plains of El Cabo	Planicies y Sierra de El Cabo
Plain and Hills of the Yucatan Peninsula	Planicies y Lomeríos de la Península de Yucatán
Mediterranean California	California Mediterránea
Southern Sierra Madre	Sierras Templadas
Altiplano Potosino	Altiplano Potosino
Eastern Sierra Madre	Sierra Madre Oriental
Northwestern Plain of the Yucatan Peninsula	Planicies Noroccidentales de la Península de Yucatán
Central American Sierra Madre and Chiapas Highlands	Sierra Madre Centroamericana y Altos de Chiapas
Western Sierra Madre Piedmont	Piedemonte de la Sierra Madre Occidental
Western Pacific Coastal Plain, Hills and Canyons	Planicie costera, Lomeríos y Cañones de Occidente
Tamaulipas-Texas Semi-Arid Plain	Planicie Semiárida de Tamaulipas-Texas
Western Pacific Plain and Hills	Planicies y Lomeríos de Occidente
Southern Mexican Pacific Coastal Plain and Hills	Planicie Costera y Lomerios del Pacifico Sur
Interior Depressions	Depresiones Intermontanas
Coastal Plain and Hills of Soconusco	Planicie Costera y Lomerios del Soconusco
Gulf of Mexico Humid Coastal Plains and Hills	Planicie Costera y Lomerios Humedos del Golfo de Mexico
Transversal Neo-Volcanic System	Eje Neo-volcánico transversal
Mexican High Plateau	Altiplanicie Mexicana
Gulf of Mexico Dry Coastal Plains and Hills	Planicies Costeras y Lomerios Secos del Golfo de Mexico
Texas-Louisiana Coastal Plain	Planicie costera de Texas-Louisiana
Sierra Los Tuxtlas	Sierra de Los Tuxtlas