

El tránsito de la geobotánica tradicional a la bioclimatología aplicada: el caso de México

Fernando GOPAR-MERINO⁽¹⁾, Valerio CASTRO-LÓPEZ⁽²⁾, Cloe PÉREZ-VALLADARES⁽²⁾, Alejandra FREGOSO⁽²⁾ y Alejandro VELÁZQUEZ⁽²⁾.

(1) Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca Km. 14.5, Unidad San Cayetano de Morelos, Toluca, Estado de México. C.P. 50200, México.

(2) Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

La crisis ambiental presente, a diferencia de otros grandes eventos catastróficos a nivel planetario, por primera vez deriva del comportamiento de una sola especie. Por su magnitud sin precedente, nos referimos a la “Antroera” como al corto periodo de transformación del planeta Tierra por conducto del Homo sapiens (Hs). Las diversas esferas sociales difieren en cuanto a las posibles consecuencias de lo que reconocemos como la Huella Humana (HH) como el vector detonador de disturbio de la integridad ambiental en buena parte de procesos irreversibles. Aquí, los autores, postulamos que es el (Hs) es quien a su vez puede, usando sus atribuciones mentales, técnicas, políticas, económicas y otras por descubrir, aportar las formas de minimizar la HH y revertir los niveles de disturbio por debajo de los umbrales de resiliencia de los socio-ecosistemas. Un ejemplo es la contribución del profesor Salvador Rivas-Martínez en su propuesta de Bioclimatología. Los autores, motivados por senda iniciativa, nos dimos a la tarea durante los últimos 15 años generar estudios de línea base para llevar a la Bioclimatología hacia líneas de investigación inéditas. Presentamos cuatro líneas de investigación que, basados en los principios de la propuesta original de Rivas-Martínez, nos han permitido abonar a entender temas ambientales. La primera, “Regionalización Bioclimatológica” refiere a la complementariedad sobre otros modelos del estudio del clima con un método robusto espacialmente explícito de los gradientes integrales expresados en isobioclimas. La segunda línea “Paleo-Bioclimatología” describe como poder reconstruir los paisajes a través de la integración de escuelas paleo-ecológicas, bioclimatológicas y geográficas y sus implicaciones en los modelos predictivos. La tercera línea “Etno-bioclimatología” se ha desarrollado para entender procesos de domesticación del espacio donde las prácticas milenarias de los grupos indígenas se hacen presentes en morfotipos geoculturales. La última línea “Bioclimatología del paisaje” abona a entender las grandes transformaciones del mosaico de paisajes urbanos-rurales-naturales actualmente imbricados y con consecuencias sociales, culturales y políticas. En suma, los autores buscamos hacer honor el legado dejado por el Salvador Rivas-Martínez a su contribución y apunta a detonar propuestas de buen manejo ambiental a partir de la generación de conocimiento de vanguardia donde el estudio de la vegetación en cada una de las líneas de investigación se convierte en el indicador principal de los ejes de validación de los resultados.

Introducción

La inquietud del ser humano por entender las causas proximales y subyacentes que rigen los elementos del clima que afectan sus actividades, principalmente las relacionadas con la vegetación (nativas y las afines a las prácticas agrícolas), han sido objeto de estudio desde el origen mismo de la ciencia (Bennett, 1869; Bonan, 2008). No obstante, en las últimas décadas, este tema ha tomado gran relevancia debido a los efectos referidos como calentamiento global, hoy día mejor acuñado como disrupciones climáticas globales (Shukla et al., 2019, McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). El impacto de estos procesos disruptivos climáticos es hoy día incuestionable, aunque las capacidades científicas para predecir magnitud, temporalidad y alcance geográfico son aún temas inconclusos. Esto resulta ser de los temas de vanguardia en las agendas de la comunidad científica, así como en las políticas públicas y sus impactos en los sectores social y productivo (Mills-Novoa et al., 2020; Sánchez & Garduño, 2008).

Las principales propuestas de clasificación climática desarrolladas hasta el final del siglo XX, aluden a la existencia de una estrecha relación de la distribución del clima con la ubicación espacial de las comunidades vegetales en grandes extensiones de la superficie terrestre (Foley et al., 2000; Metzger et al., 2013). Tal correspondencia de co-evolución se ve reflejada en las diversas adecuaciones morfo-fisiológicas que presentan las plantas, acorde, principalmente, a las condiciones climáticas predominantes en área en el que habitan (Box, 1996; Bonan, 2008). Dichas observaciones hicieron que las propuestas de categorización climática estuvieran compuestas, simultáneamente, tanto por elementos físicos (elementos meteorológicos como la temperatura, precipitaciones, viento, etc.) como por elementos biológicos (principalmente vegetación) (Foley et al., 2000; Sánchez & Garduño, 2008; Adams, 2010). Ante esto último, en los últimos años, se hizo necesario la formulación de nuevas propuestas de clasificación, que apoyen, de manera esquemática, a diferentes escalas temporal y espa

cial, la identificación de la distribución espacial de los elementos meteorológicos que están ocurriendo en la Tierra.

Las nuevas tecnologías que se han desarrollado en los últimos años nos han aportado la oportunidad de estudiar diversos fenómenos naturales con mayor eficacia y precisión. El estudio del clima no ha sido la excepción. La obtención de información espacial relacionado con los diversos elementos que integran el sistema climático, a través de herramientas de Percepción Remota (PR) y su análisis realizado mediante el uso de Sistemas de Información geográfica (SIG), ha provisto de mejores resultados, a diversas escalas espaciales y temporales, en la identificación, caracterización, ordenación y expresión cartográfica de los fenómenos naturales (Brovkin, 2002; Rietkerk et al., 2011; Gopar-Merino et al., 2015; Velázquez et al., 2021).

El identificar, registrar y categorizar la riqueza biológica del planeta en relación con el clima, a diferentes escalas espaciales y temporales, ha sido uno de los principales temas de investigación y que ha tomado mayor importancia en los últimos años (Manes et al., 2021). El estudio de la relación clima-vegetación es central dado que atiende temas inaplazables y de impactos directos a las sociedades humanas, tales como seguridad alimentaria, bienes y servicios ambientales, desastres naturales entre otros (Benning et al., 2002; Lambin & Meyfroidt, 2010; Turner & Gardner, 2015; Guerra-Coss et al., 2021).

Los diversos sistemas de clasificación climático utilizados en México fueron adaptaciones de modelos de los siglos XIX y XX (García, 2004). Esto plantea un problema en la eficacia de su aplicabilidad debido a los avances tecnológicos con los que se cuenta actualmente y por la poca aplicabilidad de utilizarse para todo el territorio nacional. Actualmente, se cuenta con una enorme cantidad de datos meteorológicos, donde su precisión se ha mejorado y el manejo de gran cantidad de información se ha favorecido significativamente. Así, este trabajo expone las bondades de la propuesta de clasificación bioclimática realizada por el Dr. Rivas – Martínez et al. (2011), aplicadas en México. Se postula que este marco de clasificación bioclimática complementa a las propuestas previas existentes en México y los ejemplos aquí expuestos enriquecen el planteamiento original y aportan modelos espacialmente explícitos, componente que limitante o inexistente en las otras clasificaciones climáticas vigentes por no poder ser reproducibles a escalas finas.

Antecedentes

Principales clasificaciones climáticas utilizadas en México:

Sistema de clasificación Climática de Köppen (modificado por García)

El sistema de clasificación climática de Köppen data del año de 1936 (García, 2004; del Río, 2005). La propuesta se fundamenta en el cálculo estadístico de valores anuales de datos atmosféricos de temperatura y precipitación. Asimismo, considera a las plantas como parte

fundamental del proyecto, siendo ellas elementos importantes en la determinación de fronteras entre climas (García, 2004; del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008). La clasificación, de manera general, está compuesta por cinco categorías que están determinadas por letras mayúsculas, de la “A” a la “E”. Estas, a su vez, presenta una subdivisión, resultando en el establecimiento de 13 tipos climáticos (García, 2004; del Río, 2005) (Tabla 1).

Esta propuesta, la de Köppen, ha sido una de las de mayor aceptación en el mundo, donde México, no ha sido la excepción. No obstante, esta clasificación contempla solo variables inducidas por transiciones latitudinales y no toma en cuenta aquellas provocadas por variaciones altitudinales (García, 2004; del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008). El territorio mexicano cuenta con un territorio con un relieve sumamente diverso, teniendo desde zonas planas hasta grandes cadenas montañosas, ocasionando que en trayectos relativamente cortos las condiciones climáticas cambien de manera drástica (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008; Gopar-Merino et al., 2015; Gopar-Merino & Velázquez, 2016). Lo anterior provoca que gran parte del territorio mexicano no se adecue a la propuesta original de Köppen. Es así como, por ejemplo, los climas templados (los de tipo “C”) y fríos (los tipos “E”) no aparecen en las latitudes tropicales. Del mismo modo, el altiplano del centro de México muestra una condición seca, condición que no prevé el sistema clasificatorio de Köppen, ya que esta provocado, principalmente, por la barrera natural que provoca las grandes cadenas montañosas de nuestro país.

La Dra. Enriqueta García, en el año de 1964, realizó una serie de modificaciones al sistema clasificatorio de Köppen con el objetivo de resolver los problemas mencionadas en el párrafo anterior. García solventó las categorías climáticas de las zonas secas de la región central de México utilizando como frontera climática a la planta *Larrea tridentata* (comúnmente llamada referida a “matorrales de gobernadora”), que era una especie que se ajustaba a las zonas identificadas con climas BW (climas secos). Con esta caracterización, se anexaron rangos intermedios, donde la vegetación fue fundamental para distinguir diversas clases de climas secos en aquellos lugares donde, con la clasificación original, eran identificados como climas templados (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). Este ejercicio de apareamiento entre tipos de climas sensu Köppen y el profundo conocimiento de los tipos de vegetación de México (Miranda y Hernández-X, 1968) conllevó a lo que conocemos como la Clasificación climática de México de Köppen modificada por García (1964). La propuesta incluyó un mapa de los climas de México a una escala de 1: 1,000,000; y se considera desde entonces un referente fundamental para múltiples temas de investigación y de diseño de políticas públicas ambientales.

Sistema de clasificación climática de Thornthwaite

El sistema clasificatorio climático de Thornthwaite es contemporáneo a la propuesta creada por Köppen (Thornthwaite, 1931, 1948). Thornthwaite se percató que la clasificación de Köppen no era precisa, esto debido a

Tabla 1.
Categorías climáticas de Köppen.

Símbolo clima	Definición	Símbolo subtipo	Definición
A	Tropical lluvioso	Af	Clima de selva
		Aw	Clima de sabana
B	Seco	BS	Clima de estepa
		BW	Clima de desierto
		Cw	Clima sínico
		Cs	Clima mediterráneo o etesio
C	Templado lluvioso	Cf	Clima templado
		Cfa	Clima virginiano húmedo
		Cfb	Clima de las hayas
		Dw	Clima transbaicálico o continental boreal
D	Boreal	Df	Clima ruso canadiense, de los abedules, de los pinos u oceánico boreal
		ET	Clima de tundra
E	Frío o polar	EF	Clima de hielos perpetuos

que la propuesta de este último no era compatible con los tipos de vegetación templada cuando estas se ubicaban en regiones tropicales (Thornthwaite, 1931, 1948; Sánchez & Garduño, 2008). Asimismo, advirtió que la precipitación y la temperatura no eran los elementos más importantes para el establecimiento de la vegetación, sino que la disponibilidad de agua en el sitio (Estrés hídrico local) era importante para entender las predominantes condiciones azonales de los tipos de vegetación de América Latina. Es así como introduce el concepto de “evapotranspiración potencial (ETP)”, definido como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse en una superficie, donde el recurso agua es ilimitado en las condiciones climáticas de un lugar determinado (Thornthwaite, 1931, 1948; del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008). Los valores anuales de ETP junto con los balances hídricos (obtenidos de la diferencia Precipitación – ETP), permitió al autor definir las trece clases predominantes identificadas para su propuesta de clasificación.

Thornthwaite (1931) mostró buenos resultados en los tipos de vegetación de filiación templada de Norte América. En tanto para las áreas con vegetación de origen biogeográfico tropical, los resultados fueron pobres. Thornthwaite (1931) para México no impactó sustancialmente dado que a escalas macrorregionales como las que propuso García (1964) no aportaban cambios mayores aparentes. Si bien la propuesta de Thornthwaite cuanta con algunos mapas de la distribución climática de Estados Unidos y México, el uso de su propuesta y la escasa o nula eficacia que presenta en zonas tropicales y semiáridas hace que su uso sea limitado (del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008).

Sistema de clasificación climática de Holdridge

Holdridge propuso su categorización climática en el país de Costa Rica (Holdridge, 1967). La propuesta asume que las características fisonómicas y estructurales de la vegetación se correlacionan con parámetros macroclimáticos. Los límites de su clasificación climática están definidos por tres factores biofísicos: la precipitación media anual, la evapotranspiración y la biotemperatura. Resultado de la combinación de estos tres sirvió para

establecer siete zonas latitudinales (definidas por intervalos de biotemperatura) y seis pisos altitudinales (que van del Ecuador a los Polos). Del mismo modo, su propuesta definió nueve provincias de humedad, que, en conjunto con las dos variables anteriores, creó un conjunto de celdillas correspondientes a los espacios climáticos de distintos tipos fisonómicos-estructurales de vegetación denominados “zonas de vida” (Holdridge, 1967).

Sistema de clasificación climática de Rivas-Martínez

Las premisas fundamentales de la clasificación climática propuesta por Rivas-Martínez y colaboradores (2011), llamada en adelante como Bioclimatología, son: la de encontrar una estrecha correlación entre variables meteorológicas (con valores definidos principalmente por la temperatura y precipitación) con unidades (representados principalmente por comunidades vegetales) y que la propuesta tenga aplicabilidad mundial. La categorización del clima parte del cálculo de índices climáticos que consideran periodos de tiempo en que ciertos valores meteorológicos, principalmente los de precipitación y temperatura, afectan fisiológicamente, de manera importante, a la vegetación. Así, los momentos de mayor estrés de la vegetación por la falta o exceso de agua (producto de la lluvia) y por la presencia de altas o bajas temperaturas, condiciona, en gran parte de ellas, sus características fisonómicas, fenológicas y la distribución de los lugares donde se establecen (del Río et al., 2005; Peinado et al., 2008; Rivas-Martínez et al., 2011). La clasificación está dispuesta en tres niveles de organización: macrobioclimas (Polar, Boreal, Templado, Mediterráneo y Tropical), bioclimas y tipos climáticos (i.e. termotipos [definido por gradientes de temperatura] y ombrotipos [definido por gradientes de precipitación]) (Rivas-Martínez et al., 2011).

En México, ninguno de las propuestas de clasificación climática antes descritos, ha sustituido la propuesta por García (1964); y la propuesta de Rivas-Martínez et al (2011) no es la excepción. Algunas excepciones han ocurrido por ejemplo las contribuciones de Macías y colaboradores (Macías, 2009; Peinado et al., 2009; Peinado et al., 2010a; Peinado et al., 2010b; Macías et al., 2014).

A partir del 2010, en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM se inicia un programa de investigación que tiene como fin explorar el potencial complementario de la propuesta de Rivas-Martínez et al (2011) para las condiciones de México. Las ideas fueron

desarrolladas por los entonces alumnos de doctorado que poco a poco las convirtieron en planteamientos robustos. Aquí se describen cuatro líneas de investigación que exponen el potencial teórico-práctico de las bondades de aplicación de la Bioclimatología para México.

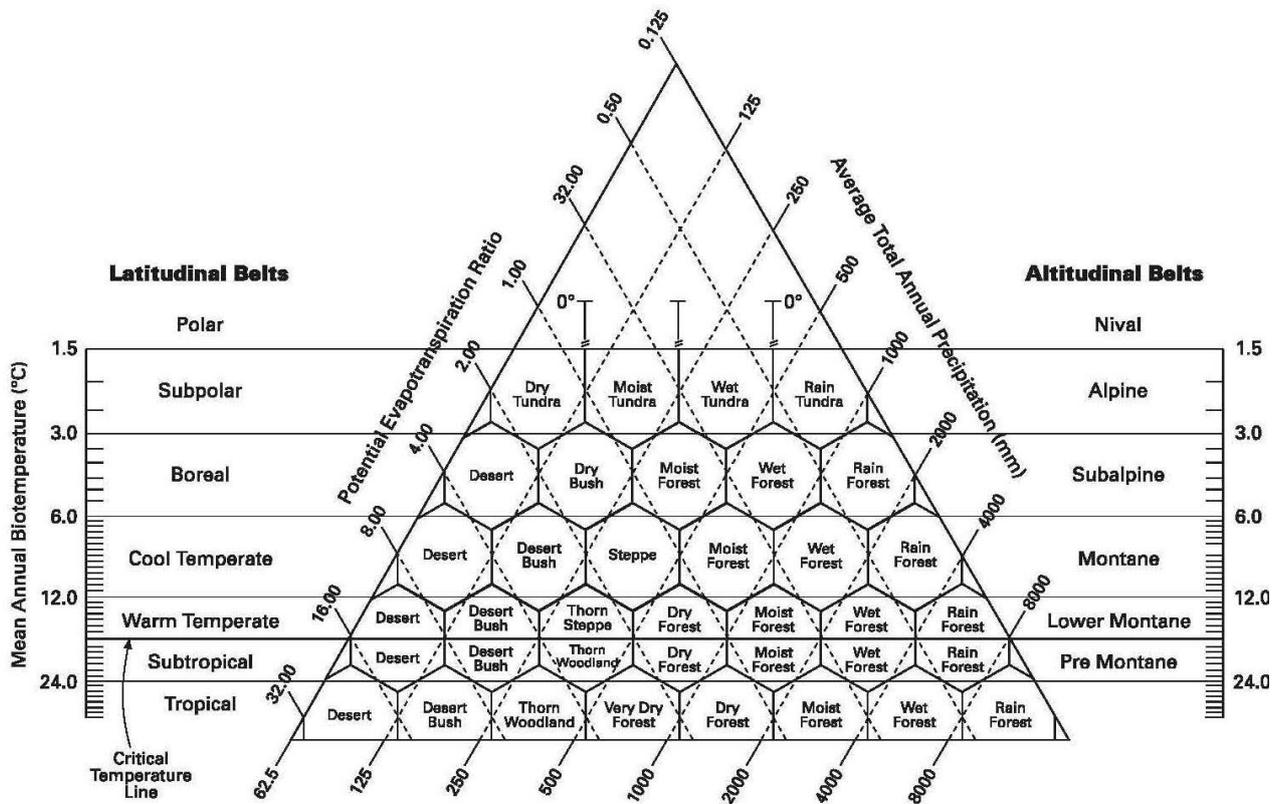


Figura 1. Propuesta climática de Holdridge (Zonas de vida) (figura tomada de Adams, 2010). Esta propuesta muestra una gran eficacia en zonas tropicales y subtropicales, sin embargo, conforme las zonas de estudio se alejan del trópico, el modelo climático muestra grandes deficiencias (del Río, Penas, & Fraile, 2005; Sánchez & Garduño, 2008; Adams, 2010).

Regionalización bioclimatológica: una nueva perspectiva en el estudio de territorios ecogeográficamente complejos en México

La primera aproximación que tuvimos como equipo de trabajo ante el tema “clima” fue la realizada en el estado de Michoacán, México. En esta investigación nos dispusimos a verificar si el sistema de clasificación bioclimática propuesta por Rivas-Martínez et al. (2011) podría reflejar, de manera precisa, concisa y confiable, a una escala meso-regional y que, además proporcionara una línea base espacialmente explícita, los diversos climas presentes en un territorio ecogeográficamente complejo. Este estado mexicano tiene casi la misma extensión territorial que el país centroamericano de Costa Rica (58,599 km² del primero vs 51,100 km² del segundo). Su ubicación geográfica, su accidentado territorio y la presencia de convergencia de dos zonas biogeográficas (neártica y neotropical) trae como consecuencia que cuente con una gran variedad de tipos de vegetación, tanto de origen tropical como templada (Velázquez et al., 2003, Sarukhán et al. 2009; Velázquez et al., 2009; Velázquez et al. 2010; Skutsch et al., 2013). Los insumos base para la construcción de la cartografía climática, y por ende, de la caracterización bioclimática, fueron tomados del Atlas Climático de México (ACM) (Fernández-Eguiarte et al., 2011). Este atlas tomo sus insumos prove-

nientes del Sistema Meteorológico Nacional de México. Los datos los analizó y rasterizó acorde al método propuesto por Hijmans et al. (2005), mismo que se uso en el diseño para WorldClim (<http://www.worldclim.org>). La capa raster resultante del ACM contuvo datos únicos por pixel con tamaño cerca de 1 km², lo que para una escala de análisis climática, cuenta con información muy precisa del área de estudio. Las capas climáticas (temperatura y precipitación) fueron analizadas en un SIG a la luz de los índices bioclimáticos propuestos por Rivas-Martínez et al. (2011). Con base a lo anterior, cada píxel obtuvo cada categoría climática de la clasificación bioclimática (macrobioclima, bioclima, termotipo y ombrotipo). Su superposición espacial de cada una de las capas ráster nos dio la posibilidad de obtener los isobioclimas presentes en la región. El resultado del análisis de las variables climáticas nos arrojó la presencia de un macrobioclima, tres bioclimas, cuatro termotipos, cinco ombrotipos, y 14 isobioclimas. El bioclima predominante en el estado fue el Tropical pluviestacional, cubriendo el 56.17% del territorio. El Tropical pluviestacional mesotropical subhúmedo y el Tropical pluviestacional termotropical subhúmedo predominan en Michoacán, abarcando cerca del 41% de la entidad federativa.

Este estudio nos arrojó que el enfoque bioclimático demostró ser una aproximación de estudio muy útil en

dos sentidos: en primer lugar, la bioclimatología nos ayudó a identificar patrones climáticos a lo largo de

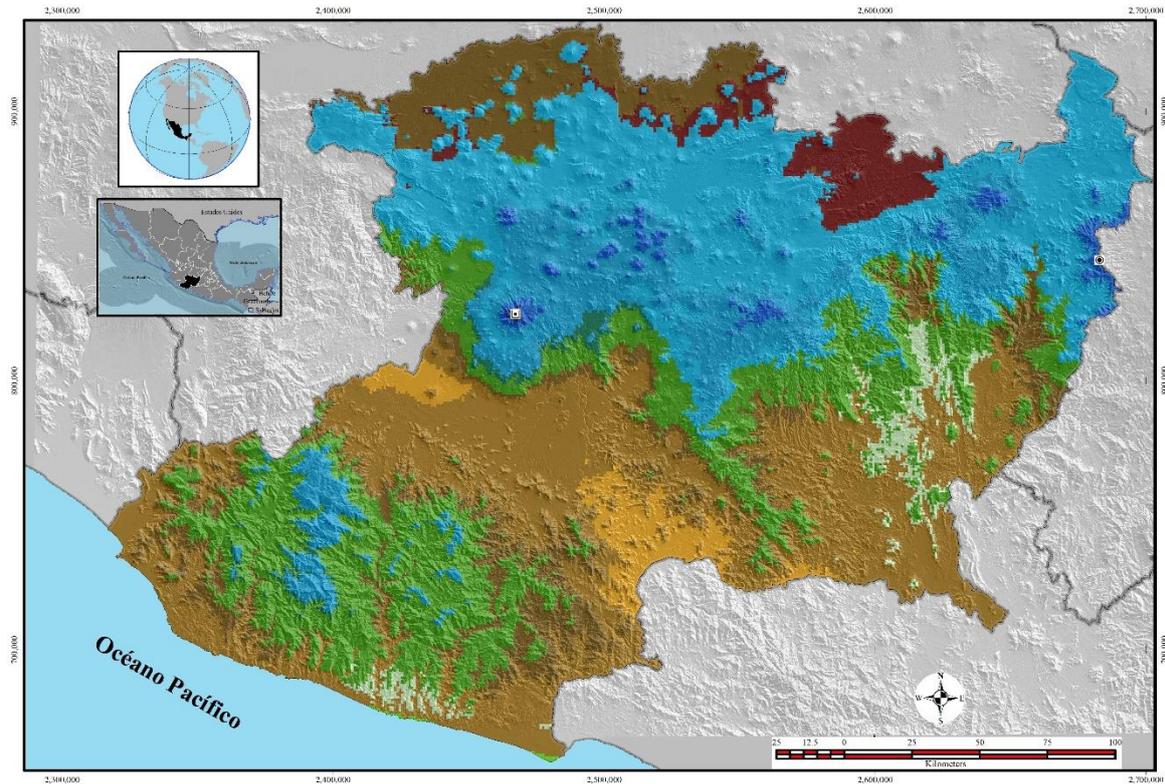


Figura 2. Isobioclimas representados cartográficamente para el Estado de Michoacán, México. Una revisión detallada de esto se puede encontrar en Gopar-Merino et al., 2015.

Tabla 2.

Leyenda de figura 2. La combinación de macrobioclima, bioclimas, termotipos y ombrotipos se expresa en isobioclimas (celdas de color), que a su vez describen gradientes de temperatura y humedad. Las celdas en blanco (--) representan ausencia de categoría bioclimática.

Macrobioclima	Bioclimas	Termotipos	Ombrotipos				
			Hiper-húmedo	Húmedo	Subhúmedo	Seco	Semi-árido
Tropical	Pluvial	Supratropical	■	●			
		Infratropical	--			--	--
	Pluviestacional	Termotropical	--			--	--
		Mesotropical	--			--	--
		Supratropical			--	--	--
	Xérico	Infratropical	--	--	--		
		Termotropical	--	--	--		
		Mesotropical	--	--	--		

gradientes altitudinales. En segundo lugar, facilitó sustancialmente la expresión corológica de estos patrones climáticos. Es así como, esta investigación partió con la premisa de saber si el enfoque bioclimático podría representar la complejidad del territorio que comprende el estado de Michoacán. Del mismo modo, comprobar si el uso de los índices climáticos con datos climáticos en formato ráster permitiría crear un método cartográfico rigurosa para expresar la diversidad climática a escala mesoregional. La importancia del mapa resultante de esta investigación da la línea base de, por lo menos, cuatro estudios que se realizarán en un futuro: 1) Expresar la referencia para el modelado de antiguos patrones de distribución de vegetación nativa. 2) Sirve de referencia

de la cobertura de uso del suelo actual ante los posibles cambios de cubiertas que puedan surgir a corto, mediano y largo plazo en el territorio. 3) El mapa sirve de referencia para estudios de correlación entre climas y usos específicos del suelo. 4) Finalmente, el mapa es la línea base para identificar el grado de perturbación de las cubiertas del terreno producto del cambio climático.

Paleo-Bioclimatología: reconstruyendo el pasado con modelos espacialmente explícitos para entender el futuro

El área de estudio se ubica entre la parte norte del estado de Michoacán y la parte sur del estado de Guanajuato en el centro de México. Por un lado, la actividad vol-

cánica y tectónica ha mantenido un impacto en la transformación del paisaje desde el Oligoceno hasta el Holoceno (Gómez-Vasconcelos et al., 2015). Por otro lado, el cambio climático durante en el Cuaternario han incidido en la distribución de la vegetación a escala regional (Israde et al., 2010). Actualmente, tres tipos de vegetación dominan en el área de estudio con afinidades Holárticas y Neotropicales. El bosque templado se distribuye en las zonas de montañas y en lomeríos, el bosque tropical seco es común encontrarlo entre lomeríos y las llanuras, la matorral en sitios abiertos y con alta perturbación antrópica, la cual es muy característico en las planicies (Rzedowski y Calderon, 1987). Por último, la importancia de esta área de estudio es porque presenta una larga historia de la vegetación, alberga una alta diversidad florística, registros continuos del cambio climático y

una larga ocupación por el imperio Purépecha.

La parte metodológica se construyó en tres fases. La primera parte se realizó un análisis bioclimático para expresar las superficies climáticas con base en la clasificación de Rivas-Martínez et al. (2011) y se siguió la metodología de Gopar-Merino et al. (2015) para cartografiar los isobioclimas a escala regional. Los datos obtenidos anteriormente se cruzaron con los datos de uso de suelo y vegetación de la serie V de INEGI (INEGI, 2013), la disección vertical (Priego-Santander et al. 2003), y la geología (INEGI, 1984) siguiendo la lógica booleana. Lo anterior permitió reconstruir la cubierta de vegetación en sitios en donde carece vegetación natural. El mapa final se validó con 43 levantamientos de vegetación.

La segunda parte, se realizó levantamientos de mues

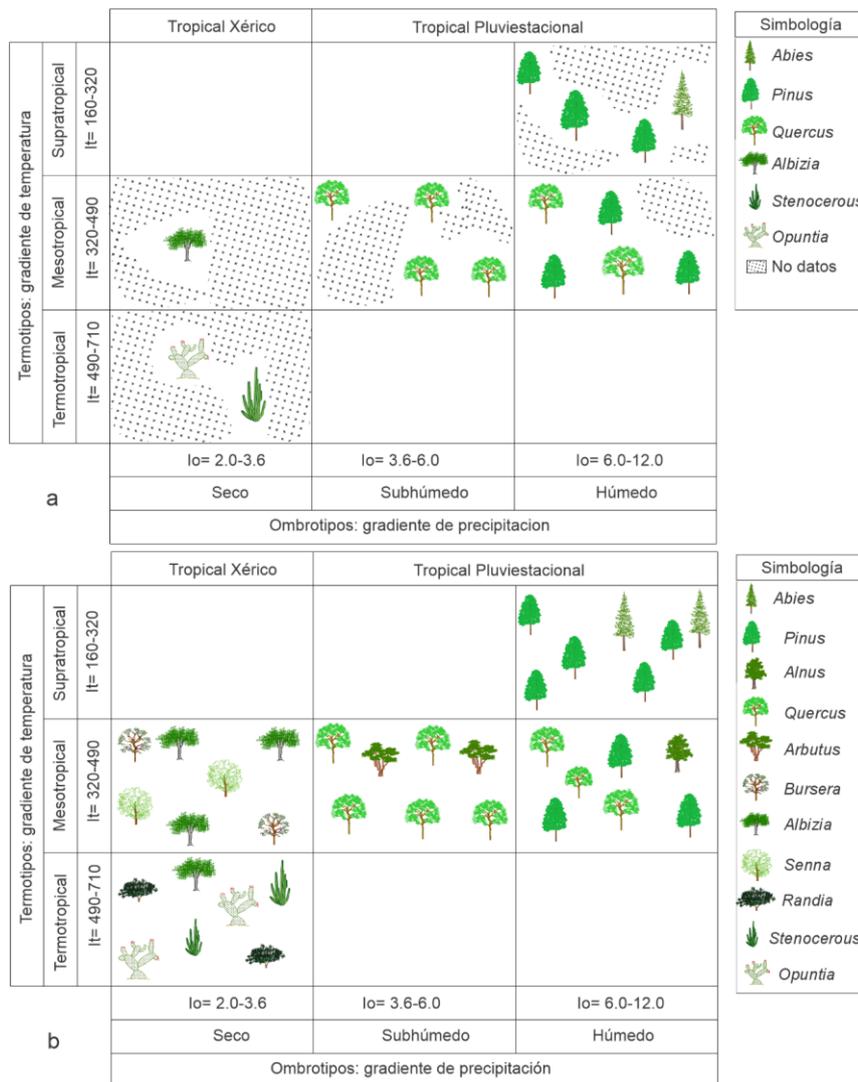


Figura 3. Relación de los isobioclimas con los tipos de vegetación. a) Relación de los isobioclimas con la cubierta de vegetación de acuerdo con INEGI. Los sitios achurados se desconoce el tipo de vegetación dado al alto impacto antrópico en el sitio. b) Los relictos de vegetación que aún prevalecen aislados ayudaron a reconocer los elementos arbóreos más representativos en cada isobioclima. En el Tropical Xérico Termotropical Seco y el Tropical Xérico Mesotropical Seco mostraron relación con el bosque tropical seco y se limitaron en las zonas de lomeríos y planicies muy característicos en el Bajío de México. Los relictos de vegetación ayudó a reconstruir los sitios en donde existe una limitada cubierta de vegetación o sitios con alta cubierta antrópica “No datos”, mostrando de que *Albizia*, *Senna* y *Bursera* tienen mayor preferencia por el Tropical Xérico Mesotropical Seco (Fig. 3b). Una descripción detallada se puede revisar en López-Castro y Velázquez (2019).

tras de musgos en diferentes tipos de vegetación, las cuales se analizaron con técnicas para extracción de polen y se identificaron usando un microscopio óptico. Finalmente, para explorar si los isobioclimas presentaban alguna relación con la lluvia de polen moderno y con la vegetación oriunda se realizó un análisis multivariado.

La integración de enfoques (geográfico y palinológico

co) bajo la perspectiva bioclimática permitió reconocer los patrones climáticos y la distribución de la cubierta de vegetación en sitios con alto impacto antrópico. Los isobioclimas Tropical Pluviestacional Mesotropical Subhúmedo y Tropical Pluviestacional Mesotropical Húmedo presentaron mayor relación con el bosque de *Pinus*, el bosque de *Pinus-Quercus* y bosque de *Quercus* (Fig.3a).

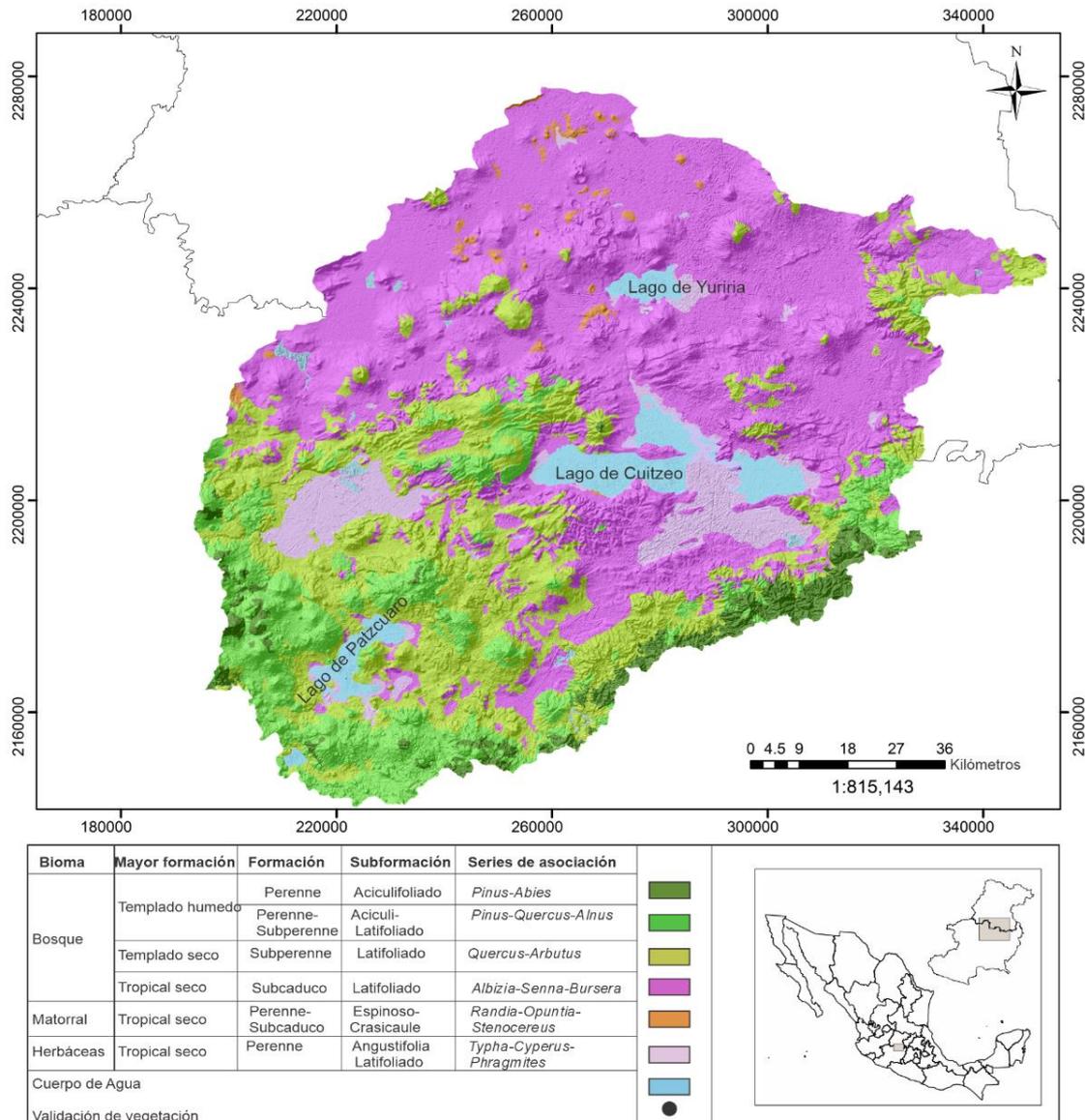


Figura 4. Reconstrucción espacial de los tipos de vegetación en la región Purhépecha. La vegetación reconstruida muestra un patrón de distribución altitudinal. Modificado de López-Castro y Velázquez (2019).

La reconstrucción de la vegetación muestra que el bosque tropical seco subcaduco latifoliado de *Albizia-Senna-Bursera* debería ser la vegetación dominante si no existiera la influencia antrópica en el sitio. El menos representado son: el matorral tropical seco espinoso-crasicaule perene-subcaducifolio de *Randia-Opuntia-Stenocereus* y la herbácea tropical seco perenne angustifolia-latifoliado de *Typha-Cyperus-Phragmites* cubriendo menos del 5% del área total (Fig. 4).

El análisis multivariado de la lluvia de polen y los isobioclimas indican que el polen sigue el mismo patrón que los isobioclima. Los taxa templados templado se

distribuyen con altos porcentajes en los isobioclimas Tropical Pluviestacional Mesotropical Húmedo y Tropical Pluviestacional Supratropical Húmedo (Fig. 5). Los taxa de polen del bosque tropical seco presentaron relación con el isobioclima Tropical Xérico Termotropical Seco, muy característicos en la zona de planicies. Los taxa de polen de matorral son más comunes encontrarlos en altas abundancias en sitios abiertos y con un alto impacto antrópico característicos en la zona de planicies.

La integración de enfoques paisajísticos (paleoecológico, geográfico y bioclimático) aportó información relevante sobre el conocimiento de la relación polen-

vegetación-clima y permitió generar un primer escenario histórico de los tipos de vegetación. Esta información puede ser muy útil para reconstruir los escenarios históricos, principalmente para pasar de datos puntuales a datos espaciales durante el Holoceno y generar datos cuantitativos. Por ello, partir del enfoque bioclimático como eje central de la investigación puede ayudar a entender la distribución del bosque tropical seco, el bosque templado húmedo y el impacto antropogénico hacia estos paisajes.

La bondad de integrar los enfoques es porque permite contar con una perspectiva analítica de las variaciones de la cubierta de vegetación a través de diferentes escalas temporales. La construcción de la integración fue posible a partir de la conjunción de pasos metodológicos que se integraron en un SIG. En primer lugar, fue contar con una clasificación climática cuantificada que demostrara una relación existente entre la distribución de los patrones de vegetación, el clima y ayudara al mapeo de la

vegetación nativa (Rivas-Martínez et al., 2011). En segundo lugar, la correlación entre los componentes del paisaje como: la cubierta de vegetación, los isobioclimas y el polen permitió reconstruir con mayor detalle la distribución de la cubierta de vegetación oriunda, especialmente en aquellas regiones que se han transformado por las fuertes presiones antrópicas desde los últimos milenios (Butzer y Butzer, 1997).

La integración de enfoques (geográfico y palinológico) coordinada bajo la línea base del enfoque bioclimático ayudó a entender de manera detallada la distribución de la vegetación actual y la vegetación del pasado. Los resultados muestran que la integración de enfoques es de gran utilidad para comprender la dinámica de la vegetación y su relación con los patrones climáticos. Por último, esta información puede servir como línea base para futuras investigaciones paleoecológicas para pasar de datos puntuales a datos espaciales.

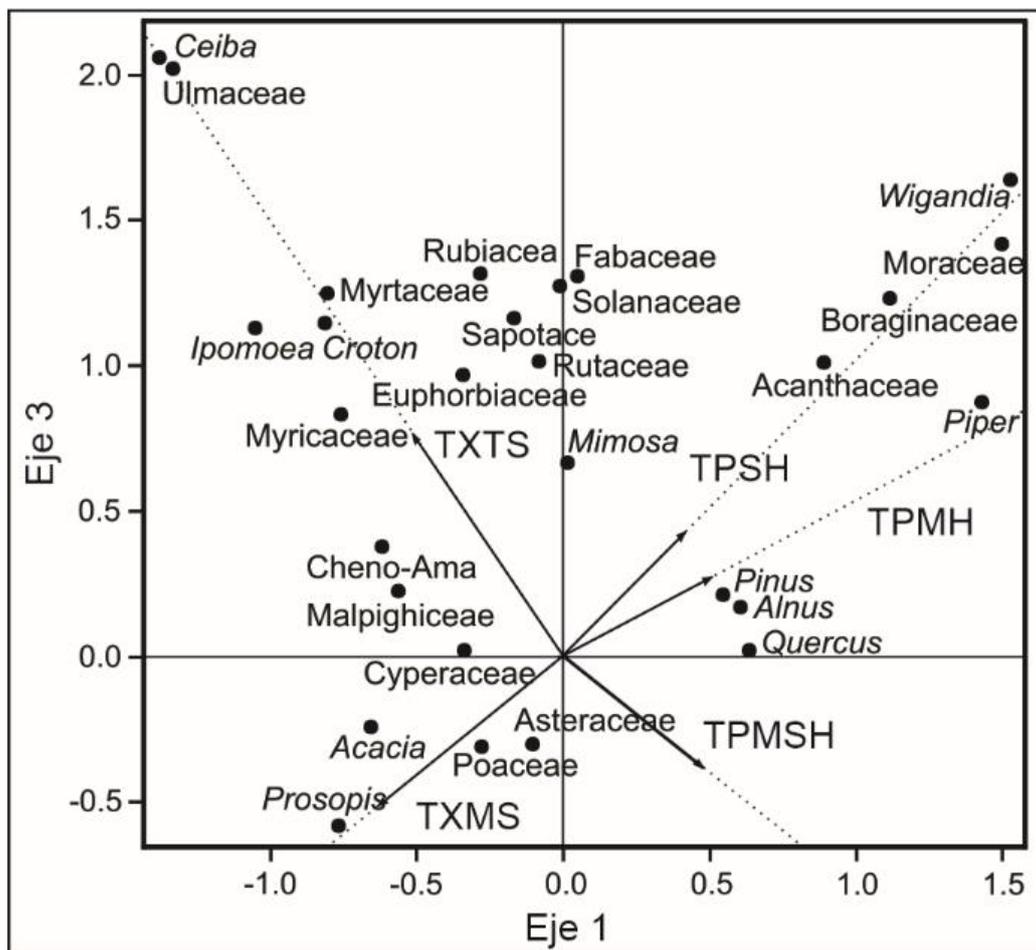


Figura 5. Diagrama de los taxa de polen con relación a los isobioclimas. Tropical Pluviestacional Supratropical Húmedo (TPSH), Tropical Pluviestacional Mesotropical Húmedo (TPMH), Tropical Pluviestacional Mesotropical SubHúmedo (TPMSH), Tropical Xérico Mesotropical Seco (TXMS), Tropical Xérico Termotropical Seco (TXTS).

Etno-Bioclimatología: revelando la relación ambiental de los pueblos oriundos de México

Los resultados previos demostraron que la bioclimatología nos aportaba datos importantes sobre la caracterización de la superficie terrestre, sus paisajes asociados, su vegetación, además de que nos apoya en la reconstrucción de escenarios pasados. Las siguientes preguntas

que nos surgieron fueron: ¿es posible mejorar la información cartográfica disponible para el manejo de vegetación a través de la regionalización climática? ¿La bioclimatología tendrá la misma respuesta de caracterización de una zona con diferentes características que la mostrada para el estado de Michoacán?

Se condujo la investigación en la Reserva de la Biósfera de Tehuacán-Cuicatlán (RBTC). La zona está caracterizada

por ser un área semiárida del Centro-Sur de México, la cual ha sido señalada como la región semi-árida más biodiversa de Norteamérica. La reserva abarca alrededor de 12,000 km² (un área similar a la nación de Jamaica), en donde predominan los climas xéricos en ~70% del área.

Los niveles de diversidad que ostenta la región se presentan a diferentes escalas de organización biológica. A nivel específico hasta la fecha se han registrado alrededor de 3,000 especies de plantas, de las cuales al menos 1,605 registran algún uso en los diversos modos de vida que han gestado las sociedades humanas que habitan la región (Lira et al., 2009). Actualmente en la reserva existen diez grupos con identidades étnicas y formas de vida asociadas a esta biodiversidad útil.

Las plantas útiles a las que se hace mención se distribuyen en alguna de las 36 comunidades de plantas descritas hasta la fecha (Valiente-Banuet et al., 2009). Esta alta diversidad responde a una amplia variabilidad morfológica y fisiológica de plantas que ha dado como resultado una amplia gama de comunidades vegetales, entre las que se encuentran diversos tipos de bosques de cactáceas columnares, que se expresan como variantes de matorrales xerófilos con una alta densidad de cactus de gran envergadura. Entre los más extendidos se encuentran los dominados fisionómica o estructuralmente por

Pachycereus weberi y *Neoboubaumia tetetzo*.

Cada una de estas comunidades vegetales provee un conjunto particular de plantas útiles para las comunidades humanas que habitan la RBTC. Con la finalidad de entender los patrones de distribución de esta biodiversidad útil, se recurrió al uso de la regionalización bioclimática para apoyar la elaboración de cartografía detallada sobre la distribución de comunidades vegetales de la región (Fig. 6). Se utilizó como insumo base el mapa de tipos de vegetación de INEGI en formato vectorial, información que se detalló con apoyo de la regionalización bioclimática y el análisis clima-vegetación. Para la reasignación de la información cartográfica, se inició con el análisis de vinculación entre los sistemas clasificatorios del mapa base y del mapa final. Esto se realizó utilizando criterios florísticos, estructurales y fenológicos de la vegetación, para identificar cuáles eran las equivalencias entre ambos sistemas clasificatorios. Una vez establecida esta asociación, la re-categorización de polígonos se llevó a cabo partiendo del análisis eco-geográfico de la zona de estudio, y de la definición de las relaciones ecológicas de las comunidades vegetales, este proceso se apoyó en el uso de información geo-ecológica en formato vectorial como litología y topografía para la generación de un mapa preliminar de comunidades vegetales.

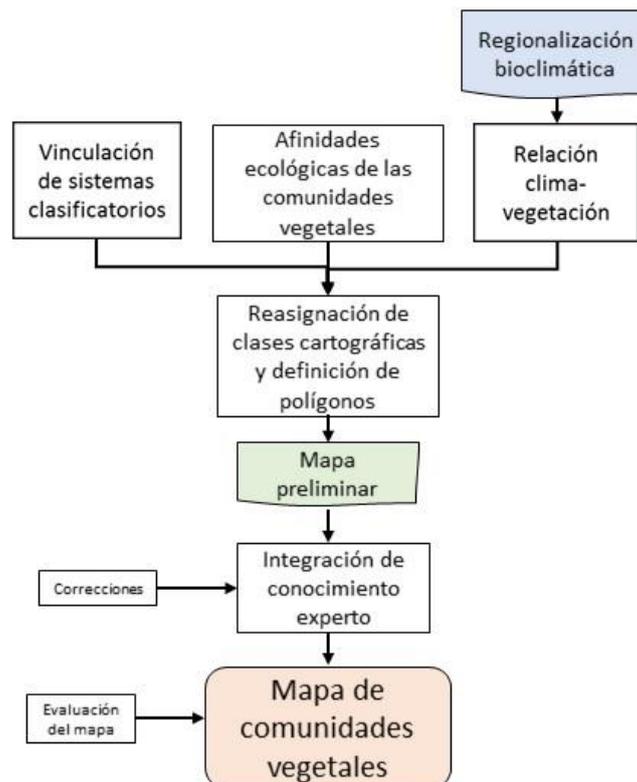


Figura 6. Diagrama de la metodología utilizada para la elaboración de cartografía de comunidades vegetales apoyada en la regionalización bioclimática de Rivas-Martínez. Adaptado de Pérez-Valladares et al. (2019).

Este primer mapa se revisó con expertos, quienes evaluaron la información cartográfica, haciendo correcciones sobre el proceso y aportando información puntual

sobre la ubicación de comunidades vegetales. Esto permitió integrar el conocimiento gestado de alrededor de 25 años de estudios en la región en una interfase gráfica

que muestra los patrones de distribución de las comunidades vegetales en la RBTC (Fig. 7). Con la finalidad de estimar la confiabilidad de la información cartográfica, el mapa fue sometido a un proceso de evaluación a través del cual se calculó el grado de certidumbre (sitios en donde la información provista por el mapa y la realidad fueron compatibles) para cada clase cartográfica. Mientras que algunas de las clases de mayor distribución

presentaron valores de certidumbre muy altos, se identificaron clases cartográficas cuyo valor de certidumbre fue insuficiente. El área de estudio es una zona geocológicamente compleja y extensa, así mismo el número de clases cartográficas supone una importante mejora en el detalle de información, lo cual puede implicar una mayor probabilidad de error, por lo anterior será necesario seguir sumando esfuerzos mejorando la geodatabase.

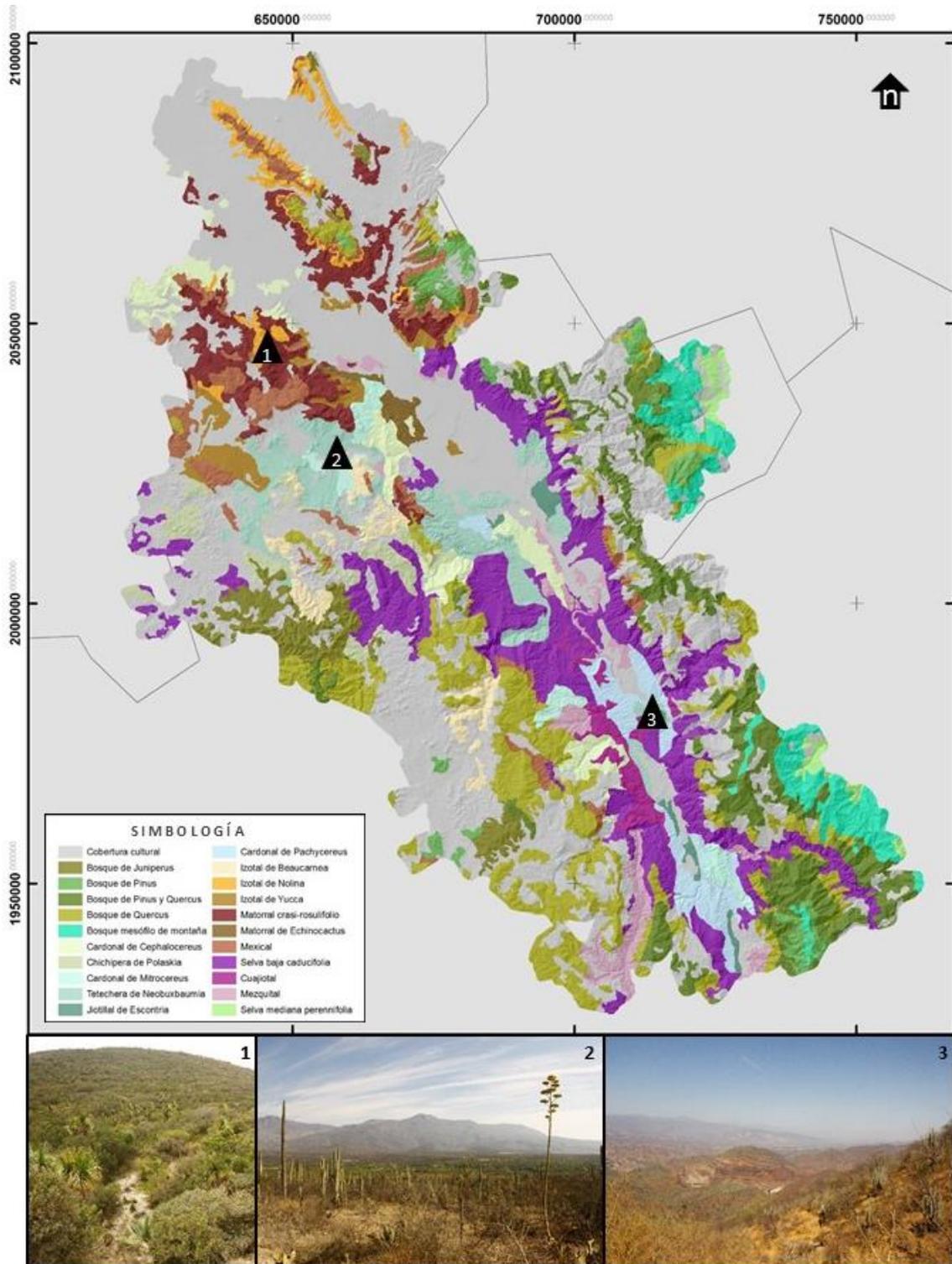


Figura 7. Mapa de comunidades de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán-Cuicatlán. En fotografías se muestran tres comunidades vegetales: 1) Izotal de *Nolina longifolia*, 2) Tetchera de *Neobuxbaumia tetetzo* y 3) Cardonal de *Pachycereus weberi*.

Bioclimatología del paisaje: entendiendo el mosaico de paisajes como eje de la pérdida del patrimonio social, cultural y natural

En este último caso que se presenta, el grupo analiza los procesos de desintegración de los paisajes rurales y naturales en el centro de México, el caso de la Megalópolis de la Ciudad de México. Con la pregunta ¿El uso de la bioclimatología permite entender mejor el impacto de la actividad humana en la pérdida de bienes y servicios ambientales de los paisajes rurales?, analizamos los procesos de cambio en los paisajes predominantes de dicha región

Junto con el cambio climático, la expansión urbana descontrolada se reconoce como un factor importante que perturba la integridad global de los ecosistemas rurales y naturales (Antrop 2004; Lambin y Geist 2006). Las tendencias de expansión urbana son procesos típicamente irreversibles que transforman los paisajes rurales y naturales en asentamientos humanos (Brueckner 2000). La mayor parte de la atención científica se ha centrado en cuestiones económicas, demográficas y de infraestructura derivadas de la invasión urbana, poca atención se ha dado al impacto de la degradación del paisaje en los servicios ambientales circundantes (Musaoglu et al. 2005; Heistermann et al. 2006; Martínez-Zarzoso y Maruotti 2011; Li et al. 2018).

Existen ejemplos de ciudades que explotan los recursos esenciales que las sustentan, como el agua, la disponibilidad de alimentos y los servicios ambientales de los ecosistemas que ayudan a regular el clima. Ciudad del Cabo, Lima, Shanghai y Ciudad de México son algunos de los ejemplos actuales más conocidos (Flint y Raco 2012). Varios autores (Geist y Lambin 2002; Veldkamp y Verburg 2004; Willemen et al. 2012) han enfatizado la necesidad de tal investigación para investigar las causas próximas y subyacentes de la invasión urbana. La investigación a múltiples escalas (temporal) sobre la cobertura del suelo, el uso del suelo y la dinámica de la vegetación es fundamental para desentrañar tendencias e identificar a los actores que pueden ayudar a prevenir la pérdida irreversible resultante de servicios ambientales en áreas rurales / naturales (Turner II et al. 1990; Velázquez et al. 2010). Esto es particularmente importante en contextos urbanos donde el acceso humano a los recursos esenciales puede verse amenazado. Por ejemplo, la falta de provisión de alimentos de las áreas rurales (Villamar y Aguilar 2020).

La Megalópolis de la Ciudad de México (MCM) es un ejemplo de deterioro de las condiciones ambientales. El tamaño de la población humana aumentó drásticamente entre 1980 y 2000 (Ward 1981) con un crecimiento continuo posterior (Aguilar 2008). Se estima que la MCM contiene alrededor de 23 millones de personas, si se consideran todos los asentamientos humanos circundantes, en donde la población puede duplicarse, convirtiendo a MCM en una Gigalópolis tanto en tamaño como en conectividad (Schteingart 1989; Aguilar 2008).

Los paisajes naturales, rurales y urbanos en ciudades en expansión como el MCM se han investigado de forma independiente a pesar de su compleja interacción social, geográfica y funcional. La gobernanza en tales condiciones resulta un desafío, ya que la configuración territorial está compuesta por múltiples actores.

Esta línea de investigación documenta las tendencias de pérdida de los paisajes rurales en la Megalópolis de la Ciudad de México con énfasis en las Sierras de Las Cruces y Chichinautzin.

Los datos de cobertura terrestre se utilizaron como insumo principal y se utilizaron dos conjuntos de datos de entrada a saber: i) datos vectoriales del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) a escala 1: 250.000 para los años 1976 (T1) y 2016 (T2) más ii) imágenes raster de Satélite Sentinel (2018) de la Agencia Espacial Europea (ESA). El primero fue verificado utilizando datos de campo recopilados por los empleados del INEGI y un mapa de uso de suelo / vegetación a escala 1: 50.000 del INEGI. Este último se sometió a un proceso de clasificación orientado a objetos para mejorar la visibilidad de los cambios en la extensión de los asentamientos humanos y la imagen reclasificada se redujo reagrupando el tamaño de los píxeles en unidades cartográficas de 25 ha. Las categorías de uso del suelo / cobertura del suelo se reagruparon siguiendo la categoría "Nivel 1" de la Clasificación de Vegetación Jerárquica Estandarizada SECLAVEMEX (Velázquez et al. 2016) y se reorganizaron a escala 1: 100,000 (polígonos mayores de 25 hectáreas). Las clases finales mapeadas fueron: 1 Paisajes naturales que incluyen Bosque, Pastizales nativos, Matorrales xerofíticos y Cuerpos de agua, 2. Paisajes rurales, que incluye áreas de cultivo y 3. Paisajes urbanos representando a los asentamientos humanos. El cambio de cobertura terrestre se calculó comparando datos para los dos períodos de tiempo (T1, T2). Estos cambios fueron regionalizados con base en la cartografía de isobioclimas (sensu Gopal y Velázquez 2015). Esto derivó en entender qué tipos de paisajes rurales han sido más afectados con respecto a las condiciones climáticas.

Los resultados indicaron que la pérdida más significativa en porcentaje de paisaje rural transformado se concentró en el isobioclima Tropical xérico mesotropical seco, seguido por el Tropical pluviestacional mesotropical subhúmedo y el Tropical xérico termotropical. Esto tiene implicaciones significativas proximales dado que múltiples sistemas productivos de alto rendimiento se concentran en esta región. En donde destacan los cultivos de avena, trigo, nopal, y decenas de variedades nativas de maíz. La pérdida de estos sistemas productivos en éstos isobioclimas tiene dos implicaciones. La primera es la pérdida de identidad de muchos pueblos originarios cuya existencia radica en las actividades propias de los cultivos vistos como sus paisajes culturales que dan identidad y pertenencia. La segunda es la pérdida de bienes y servicios que estos paisajes rurales distribuidos en esos isobioclimas, aportan a la Megalópolis tales como áreas de infiltración de agua de lluvia, recarga de los mantos acuíferos, zonas de contención de la expansión urbana y reservorios de agrobiodiversidad, tal es el caso de la alta diversidad genética de variedades nativas de maíz importantes para la seguridad alimentaria (Ávila, 2011). En el caso de los paisajes naturales, las principales pérdidas en porcentaje de transformación se dan en los isobioclimas Tropical pluviestacionales, principalmente en los mesotropical húmedo y subhúmedo y en el supratropical húmedo. En este caso, se presenta el avance del paisaje urbano fragmentando los paisajes naturales, con su consecuente pérdida en bienes y servicios ambientales en dichos isobioclimas, En este caso podemos mencionar la pérdida de los procesos de infiltración, control de la erosión y escorrentía y zonas de contención de la expansión urbana.

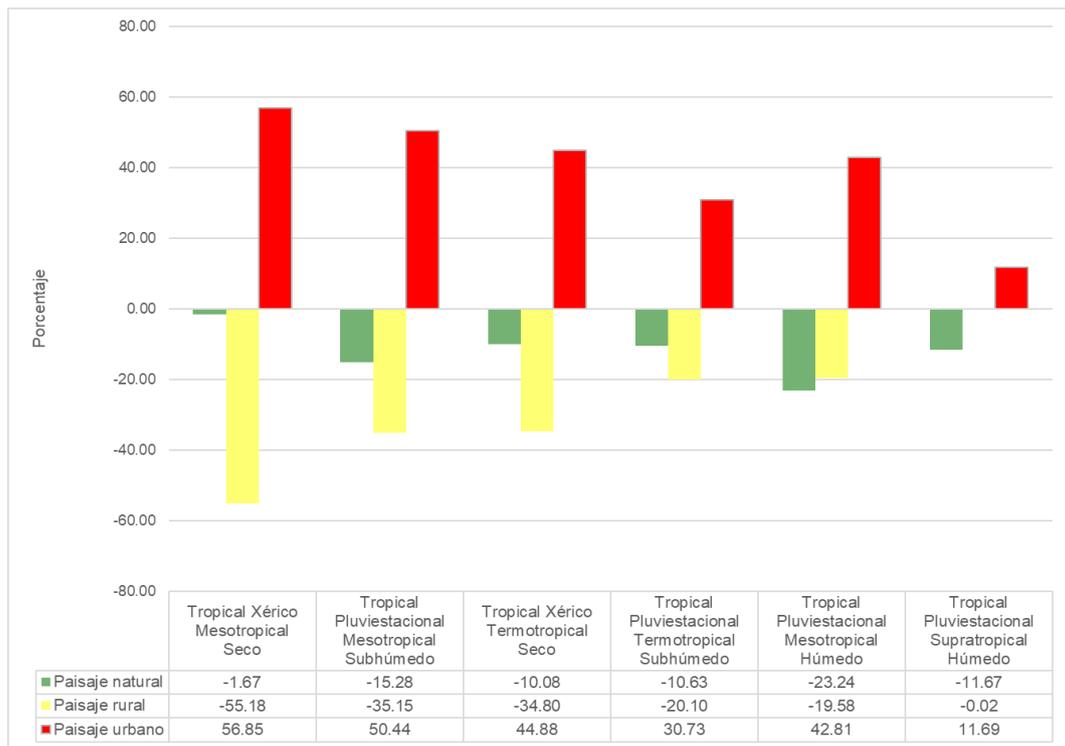


Figura 8. Pérdida de Paisajes por isobioclima, años 1976 y 2018. La pérdida de los paisajes rurales, en porcentaje significativo sustituidos por los paisajes urbanos se hacen muy evidentes en ciertos tipos de isobioclimas. Las interpretaciones sobre los sistemas productivos y las consecuencias sociales, culturales y ambientales son motivo de una investigación en curso.

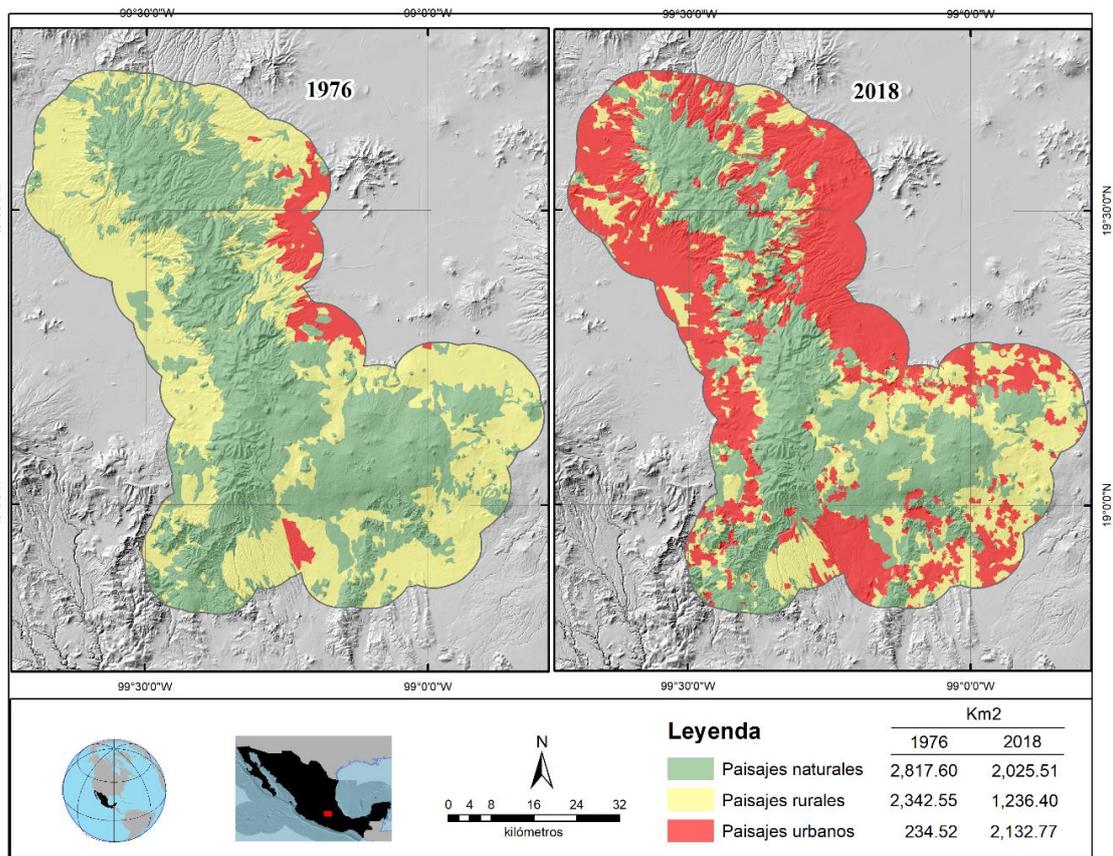


Figura 8. Desintegración rural, cambio de los paisajes naturales, rurales y urbanos en los años 1976 y 2018. Los límites de la región corresponden con las zonas de contacto entre los paisajes lacustres al este y oeste; mientras que los límites al norte y sur se derivan de contactos con otras Sierras contiguas. El factor de crecimiento de los paisajes urbanos es de casi un factor de 20 veces, lo que pone en riesgo la integridad funcional de los ecosistemas oriundos y por ende las funciones de bienes y servicios derivados de ellos.

Las implicaciones subyacentes registradas incluyen la pérdida de la identidad cultural y de gobernabilidad de las zonas rurales, como resultado de las actividades de sustento rural, dando espacio para que grupos organizados externos se establezcan con actividades ilegales. La pérdida de las aportaciones de los paisajes rurales proveedores de servicios ambientales resultado de las condiciones bioclimáticas, tiene implicaciones de costos inmensurables. Por ejemplo, la conversión de paisajes rurales en paisajes urbanos marginales de precariedad y alta vulnerabilidad socio-cultural; el costo de sustitución de bienes como agua y control de erosión, por el sellamiento de la superficie urbana (Figs. 8 y 9).

Considerando los cambios registrados en el presente trabajo, resulta relevante continuar las investigaciones para entender qué implicaciones climáticas a nivel local, generarán los cambios registrados en los paisajes rurales y naturales, así como cuantificar y monitorear los bienes y servicios ambientales que dichas regiones proveen a la megalópolis.

Consideraciones finales

Nuestro grupo de investigación ha ido abordando diferentes temáticas que se desprenden de la propuesta climática realizada por el Profesor Rivas-Martínez y colaboradores. La clasificación bioclimática ha mostrado ser robusta, que, si bien se basa en la respuesta fisiológica de las plantas a factores extremos de variables atmosféricas, como lo son la temperatura y la precipitación, ha apoyado a abordar diferentes temas que no solo están enfocados exclusivamente a la vegetación. El grupo de trabajo ha ido evolucionando en cuanto a lo que a bioclimatología ofrece. El inicio fue el corroborar su aplicabilidad y hasta el día de hoy ha mostrado ser un marco teórico-práctico robusto para identificar procesos y eventos relacionados con actividades antrópicas. El siguiente paso es valorar servicios ambientales, políticas públicas e incluso, acciones a tomar ante el cambio climático. La replicabilidad de estos estudios en otras regiones del mundo es una tarea por emprender.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-PAPIIT IN105721). Los autores agradecen la colaboración de las comunidades y ejidos de la Ciudad de México, Morelos, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Guanajuato y muchas otras que han permitido que estas investigaciones se desarrollen con su apoyo a las tareas de trabajo de campo.

Literatura citada

Adams, J. (2010). *Vegetation-Climature Interactions. How Plants Make the Global Environmental*. (2nd ed.). Praxis Publishing Ltd.

Aguilar, A.G. (2008), Peri-urbanization, illegal settlements and environmental Impact in Mexico City, *Cities* 25, pp.133–145.

Ávila, J. 2011, "Los pequeños productores de maíz en milpa Alta y contaminación transgénica!" Tesis de Maestría en Desarrollo Rural, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, D.F. Pp. 244.

Bennett, A. (1869). On the Fertilisation of Winter-Flowering Plants. *Nature*, 1(1), 11–13.

Benning, T., LaPointe, D., Atkinson, C., & Vitousek, P. (2002). Interactions of climate change with biological invasions and land use in the Hawaiian Islands: Modeling the fate of endemic birds using a geographic information system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(22), 14246–14249.

Bonan, G. (2008). *Ecological climatology* (2nd ed.). Cambridge University Press

Box, E. O. (1996). Plant functional types and climate at the global scale. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 309–320.

Brovkin, V. (2002). Climate-vegetation interaction. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 12(10), 57–72.

Brueckner, J. K. (2000). Urban Sprawl: Diagnosis and Remedies. *International Regional Science Review*, 23(2), 160–171.

Butzer, K. W., & Butzer, E. K. (1997). The "natural" vegetation of the Mexican Bajío: Archival documentation of a 16th-century Savanna environment. *Quaternary International*, 43–44(97), 161–172.

del Río, Sara. (2005). El cambio climático y su influencia en la vegetación de Castilla y León (España). *Itinera Geobotanica*, 16, 534.

del Río, S., Penas, A., & Fraile, R. (2005). Analysis of recent climatic variations in Castile and Leon (Spain). *Atmospheric Research*, 73(1–2), 69–85.

Fernández-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, and C. R. Romero. (2011). Atlas Climático Digital de México. Versión 2.0. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

Flint, J., & Raco, M. (2014). 2012: The Future of Sustainable Cities: Critical Reflections. Bristol: Policy Press. In J. Flint & M. Raco (Eds.), *International Journal of Urban and Regional Research* (Vol. 38, Issue 2). *International Journal of Urban and Regional Research*.

Foley, J., Levis, S., Costa, M., Cramer, W., & Pollard, D. (2000). Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications*, 10(6), 1620–1632.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5th ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., & Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301:128–147.

Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & de Azcárate, J. G. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 6(1), art13.

Gopar-Merino, L. F., & Velázquez, A. (2016). Landscape components as predictors of vegetation coverage: the study cases of the State of Michoacán, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 2016(90).

Guerra-Coss, F. A., Badano, E. I., Cedillo-Rodríguez, I. E., Ramírez-Albores, J. E., Flores, J., Barragán-Torres, F., & Flores-Cano, J. A. (2021). Modelling

- and validation of the spatial distribution of suitable habitats for the recruitment of invasive plants on climate change scenarios: An approach from the regeneration niche. *Science of The Total Environment*, 777, 146007.
- Heistermann, M., Müller, C., & Ronneberger, K. (2006). Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 141-158.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones and A. Jarvis. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25:1965-1978.
- Holdridge, L. (1967). Life zone ecology. Tropical Science Center.
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M. S., Bischoff, J., Domínguez Vázquez, G., y Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345-357.
- Lambin, E., Geist, H., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-241.
- Lambin, E., & Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27, 108-118.
- Li, W., MacBean, N., Ciais, P., Defourny, P., Lamarche, C., Bontemps, S., Houghton, R. A., & Peng, S. (2018). Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992-2015). *Earth System Science Data*, 10(1), 219-234.
- Lira, R., Casas, A., Rosas-López, R., Paredes-Flores, M., Pérez-Negrón, E., Rangel-Landa, S., Solís, L., Torres, I., & Dávila, P. (2009). Traditional Knowledge and Useful Plant Richness in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Economic Botany*, 63(3), 271-287.
- López, Valerio Castro, and Alejandro Velazquez. 2019. "Reconstruction of native vegetation based upon integrated landscape approaches. *Biodiversity and Conservation* 28.2 (2019): 315-327.
- Macías, M. (2009). Estudio de las relaciones entre zono-biomas, bioclimas y vegetación en la costa del pacífico norteamericano. Universidad de Alcalá.
- Macías, M., Peinado, M., Giménez, J., Aguirre, J., & Delgadillo, J. (2014). Clasificación bioclimática de la vertiente del Pacífico mexicano y su relación con la vegetación potencial. *Acta Botanica Mexicana*, 109, 133-165.
- Manes, S., Costello, M. J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.-A., Jenkins, R., Khan, T. M., Kiessling, W., Krause, C., Maharaj, S. S., Midgley, G. F., Price, J., Talukdar, G., & Vale, M. M. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*, 257, 109070.
- Martínez-Zarzoso, I., & Maruotti, A. (2011). The impact of urbanization on CO2 emissions: Evidence from developing countries. *Ecological Economics*, 70(7), 1344-1353.
- Mas, F., Díaz-Gallegos, J., & Pérez-Vega, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas*, 51, 53-72.
- McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2005). *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Sayre, R., Trabucco, A., & Zomer, R. (2013). A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography*, 22(5), 630-638.
- Mills-Novoa, M., Boelens, R., Hoogesteger, J., & Vos, J. (2020). Governmentalities, hydrosocial territories and recognition politics: The making of objects and subjects for climate change adaptation in Ecuador. *Geoforum*, 115, 90-101.
- Miranda, F., & Hernández-X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 28, 29-176.
- Musaoglu, N., Tanik, A., & Kocabas, V. (2005). Identification of Land-Cover Changes Through Image Processing and Associated Impacts on Water Reservoir Conditions. *Environmental Management*, 35(2), 220-230.
- Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., Delgadillo, J., & Díaz, G. (2009). Clasificación bioclimática de la cuenca del Pacífico de México. *Acta Botánica Mexicana*.
- Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., & Rodríguez, J. (2010a). Bioclimate-Vegetation Interrelations in Northwestern Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 55(3), 311-322.
- Peinado, M., Macías, M., Ocaña-Peinado, F., Aguirre, J., & Delgadillo, J. (2010b). Bioclimates and vegetation along the Pacific basin of Northwestern Mexico. *Plant Ecology*, 212(2), 263-281.
- Peinado, M., Monje, L., & Martínez, J. (2008). El paisaje vegetal de Castilla - La Mancha. Cuarto centenario.
- Rietkerk, M., Brovkin, V., van Bodegom, P. M., Clausen, M., Dekker, S. C., Dijkstra, H. A., Goryachkin, S. V., Kabat, P., van Nes, E. H., Neutel, A.-M., Nicholson, S. E., Nobre, C., Petoukhov, V., Provenzale, A., Scheffer, M., & Seneviratne, S. I. (2011). Local ecosystem feedbacks and critical transitions in the climate. *Ecological Complexity*, 8(3), 223-228.
- Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1, 1-634.
- Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (1987). El bosque tropical caducifolio de la región Mexicana del Bajío. *Trace* 12:12-21.
- Sánchez, N., & Garduño, R. (2008). Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *ContactoS*, 68, 5-10.
- Sarukhán, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta, and J. De la Maza. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F., México.

- Schteingart, M. (1989). Los productores del espacio habitable: estado, empresa y sociedad en la ciudad de México. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano.
- Shukla, P., Skea, J., Calvo Buendía, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Roberts, D., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal, J., Vyas, P., Huntley, E., ... Malley, J. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Skutsch, M., C. Simon, A. Velázquez, and J. C. Fernández. (2013). Rights to carbon and payments for services rendered under REDD: Options for the case of Mexico. *Global Environmental Change*, 23(4):813–825.
- Thorntwaite, C. (1931). The Climates of North America: According to a New Classification. *Geographical Review*, 21(4), 633–655.
- Thorntwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B. L., Ortega-Guerrero, B., & Vázquez-Castro, G. (2012). Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3), 764–778.
- Turner, M., & Gardner, R. (2015). *Landscape ecology in Theory and practice*. Springer.
- Turner II, B., & Meyer, W. (1990). Environmental change: the human factor. In: McDonnell, M., & Pickett, S. (Eds.) *Humans as Components of Ecosystems*. Springer.
- Valiente-Banuet, A., Solís, L., Dávila, P., del Coro, M., & Silva, C. (2009). *Guía de la vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Velázquez, A., G. Bocco, F. J. Romero, and A. Pérez. (2003). A landscape perspective on biodiversity conservation: The case of Central Mexico. *Mountain Research and Development*, 23(3):240–246.
- Velázquez, A., E. M. Cue-Bar, A. Larrazabal, N. Sosa, J. Villasenor, M. McCall, and G. Ibarra-Manriquez. (2009). Building participatory landscape-based conservation alternatives: A case study of Michoacan, Mexico. *Applied Geography*, 29(4):513–526.
- Velázquez, A., J. F. Mas, G. Bocco, and J. L. Palacio-Prieto. (2010). Mapping land cover changes in Mexico, 1976-2000 and applications for guiding environmental management policy. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31(2):152–162.
- Velázquez, A., Medina García, C., Durán Medina, E., Amador, A., & Gopar Merino, L. F. (2016). *Standardized Hierarchical Vegetation Classification*. Springer International Publishing.
- Velazquez, Alejandro, et al. 2021. Merged phytosociological and geographical approach for multiple scale vegetation mapping as a baseline for public environmental policy in Mexico. *Applied Vegetation Science* 32 (2) 409-419. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.004>
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309–324.
- Villamar, I. R., & Aguilar, A. G. (2020). Deterioro ambiental y ocupación urbana irregular en la Zona Lacustre de Xochimilco, Ciudad de México. *Journal of Latin American Geography*, 19(4), 43–67.
- Watts, W. A., & Bradbury, J. P. (1982). Paleocological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research*, 17(1), 56–70.
- Ward, P. (1981). Mexico City. In: *Problems and planning in third world cities*. Croom Helm.
- Willemen, L., Barger, N. N., Brink, B. ten, Cantele, M., Erasmus, B. F. N., Fisher, J. L., Gardner, T., Holland, T. G., Kohler, F., Kotiaho, J. S., von Maltitz, G. P., Nangendo, G., Pandit, R., Parrotta, J. A., Potts, M. D., Prince, S. D., Sankaran, M., Brainich, A., Montanarella, L., & Scholes, R. (2020). How to halt the global decline of lands. *Nature Sustainability*, 3(3), 164–166.