



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**EL CONTEXTO GEOGRÁFICO DE LOS BIOCLIMAS: EL CASO DE
REGIONES ECOGEOGRÁFICAMENTE COMPLEJAS**

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
LUIS FERNANDO GOPAR MERINO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ALEJANDRO VELÁZQUEZ MONTES
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

CIUDAD DE MÉXICO, MAYO DE 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios de Posgrado. Asimismo, reconozco el apoyo complementario que este mismo CONACyT me proporcionó durante la estancia de investigación de Doctorado que realicé en la Universidad de Ottawa, Canadá. A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM, particularmente a la Subdirección de Programas Institucionales, quien me apoyó con una beca complemento que consistió en la compra del boleto de avión para realizar una estancia de investigación en Canadá.

Al proyecto PAPIIT, con clave IN202214 (Dinámica de los ecosistemas michoacanos en función del cambio climático: línea base para establecer escenarios de vulnerabilidad y adaptación), a cargo del Dr. Alejandro Velázquez Montes, por el financiamiento económico recibido para la realización de las diversas verificaciones de campo.

A los miembros de mi Comité Tutorial por su apoyo en mi formación académica:

Doc. José Alejandro Velázquez Montes

Dra. María Isabel Ramírez Ramírez

Dr. Miguel Ángel Macías Rodríguez

A los miembros del Comité Sinodal que aceptaron evaluar la presente tesis de Doctorado:

Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Dr. José Alejandro Velázquez Montes

Dr. Konrad Gejewski

Dra. María Isabel Ramírez Ramírez

Dr. Miguel Ángel Macías Rodríguez

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el haberme permitido realizar mis estudios de Doctorado en Geografía. Asimismo, reconozco y agradezco infinitamente a todas las personas que laboran en esta gran universidad, los que día con día se esfuerzan por hacer grande y confortable esta nuestra casa, a todo ellos gracias.

Al Dr. Antonio Vieyra Medrano, director del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, por permitirme el uso de las instalaciones durante mis estudios de posgrado.

Al Dr. Alejandro Velázquez, por esta nueva oportunidad que me brindó, por su gran apoyo, por sus enseñanzas, por su confianza, pero sobre todo por su amistad. Alex, lo que nos dijeron que no se podía hacer se tardó un poquito más en salir, pero aquí está. Mil gracias por todo.

A los Doctores Isabel Ramírez y Miguel Ángel Macías, por haber formado parte de mi Comité Tutorial. Por sus comentarios constructivos, por sus valiosas opiniones y por el tiempo que me brindaron para que este proyecto llegara a su fin. Gracias.

A mi gran amiga la Dr. Consuelo Medina García (Chelito), mi compañera de andadas y con la que iniciamos de menos cero esta aventura bioclimatológica. Asimismo, a los Doctores Joaquín Giménez de Azcárate y Miguel Ángel Macías por brindarme las bases teóricas de la Bioclimatología, por las grandes discusiones que tuvimos y de las cuales todos aprendimos. A Consuelo Medina, Joaquín Giménez y Miguel Ángel Macías por su apoyo en las salidas de campo, en la identificación y análisis del material biológico colectado.

A la Maestra Alejandra Larrazabal y a la Maestra Neyra Sosa por su apoyo en la revisión de la redacción final de la presente tesis. A la Maestra Larrazabal por su apoyo en la primera salida de campo y por la ayuda en el análisis de bases de datos. A la Maestra Neyra Sosa por sus acertados comentarios que ayudaron a concluir este escrito.

A la Maestra Raquel González García, en una primera fase por su apoyo incondicional y profesional en la parte correspondiente a los sistemas computacionales y subsecuentemente en la ayuda de búsqueda y préstamos de material bibliográfico. Mil gracias.

Al Dr. Konrad Gajewski por recibirme en la Universidad de Ottawa en el Departamento de Geografía, Medio Ambiente y Geomática, en el laboratorio de Paleoclimatología y Climatología. De la misma forma, a esta última universidad por las facilidades otorgadas para trabajar dentro de sus instalaciones. A los Doctores Federico Fernández y Ramón Peralta y Fabi, anterior y actual director de la UNAM-Canadá, respectivamente, por el apoyo recibido, tanto por el espacio

otorgado para poder trabajar dentro de sus instalaciones como por permitirme ser parte del alumnado durante los cursos de idiomas (inglés).

A mis amigos Faustino López, Alejandra Larrazabal, Consuelo Medina, Raquel González, Neyra Sosa, Juan Carlos, Gaby Magaña, Carina Grajales, Jimena, Alexander Quevedo, Valerio Castro, Rita Adame, Violeta Rangel, Cloe Pérez, Ignacio González, Gabriela Cuevas, Yan Gao, Estefania Cano, Rocio Aguirre y Gemma Gómez. A Carlos Santiesteban, Erik Corona, Daniel Medrano, Paty Almazán, Liz Ruiz, Andrea Sosa, Gerardo Familiar, Heidy López, Vanessa Reyes, Aline Quevedo, Bety Olvera, Leobardo Tagle, Consuelo Giraldo, Michele Healy, Viridiana Montiel, Gwen Jackson Carrey, Alma Oyosa y Gerardo Rubio. A todos ustedes que siempre estuvieron siempre a mi lado, apoyándome y alentándome a seguir, mil gracias.

Dedicatoria

A mi gran familia:

A mi maravillosa familia chiquita: a mi mamá María Elena Merino Pérez, a mi papá José Luis Gopar Álvarez†, a mis hermanos Héctor y Roberto Gopar Merino. La vida nos ha puesto grandes obstáculos y siempre hemos salido victoriosos. Nuestra familia es chiquita, pero siempre unida. Los amo. Mil gracias por estar siempre a mi lado.

A mi familia que me adoptó en Morelia, la que siempre me abrió las puertas de su hogar: Ale, Chelito, Faus, Raque, Luis Alfonso, Edgar y Neys. Siempre que los necesité ahí estuvieron, me abrieron su corazón y me dieron lo mejor de ustedes. Mi eterno agradecimiento, respeto y admiración. Saben que siempre contarán con este su amigo. Nunca terminaré de agradecerles lo tanto que me han dado. Gracias.

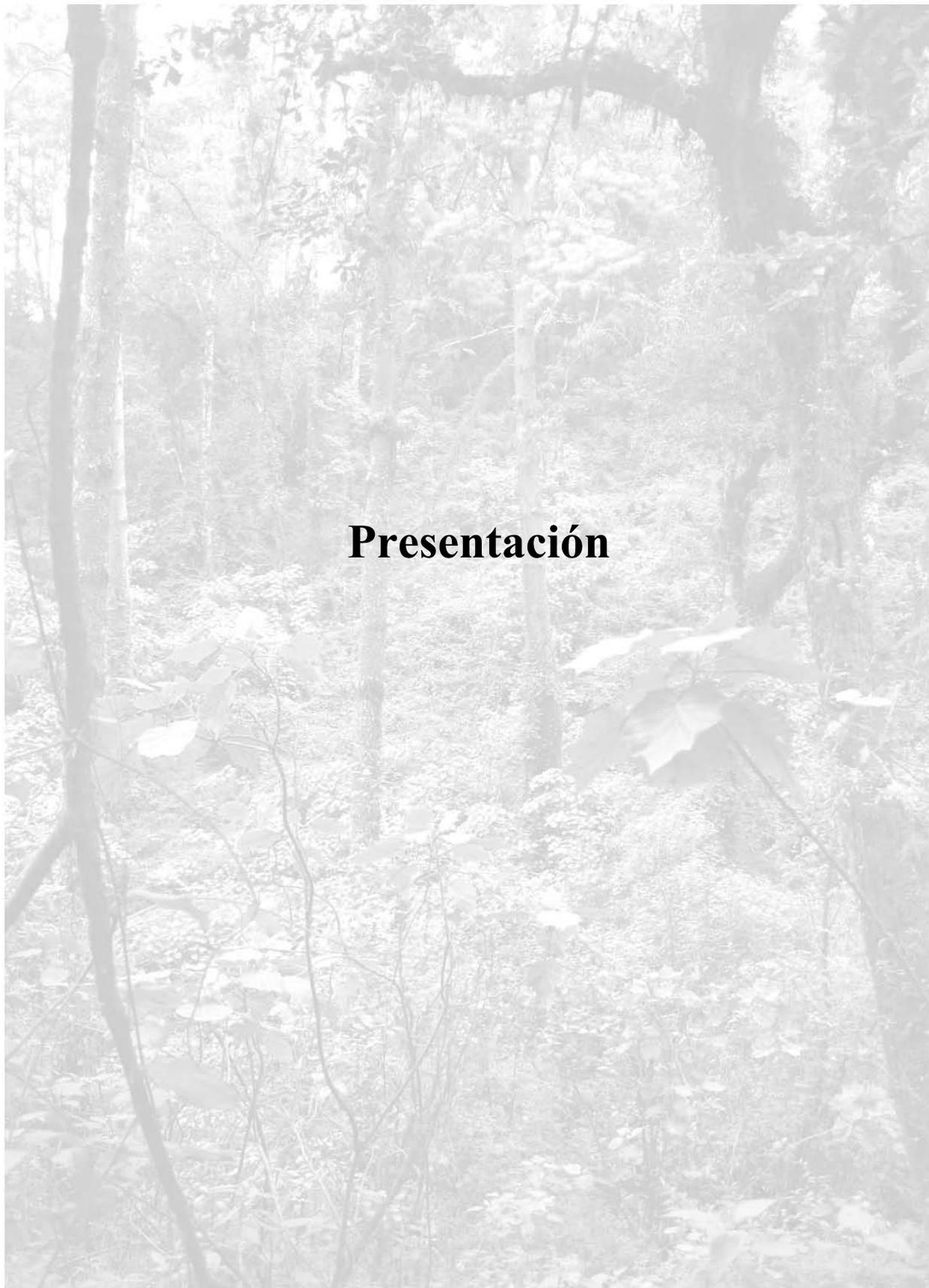
Irais y Karlita, esto es por y para ustedes. Me enseñaron mucho. Las amo. Gracias.



Contenido

<i>Presentación</i>	2
<i>Capítulo I.</i>	5
<i>Introducción</i>	5
1. Una perspectiva general del estudio del clima	6
2. Planteamiento del problema	7
3. Antecedentes	9
4. Consideraciones finales	15
5. Literatura citada	16
<i>Capítulo II. Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change</i>	24
<i>Abstract</i>	25
1. Introduction	25
2. Material and methods	27
2.1. <i>Study site</i>	27
2.2. <i>Bioclimatic cartographic expression</i>	28
2.3. <i>Bioclimate-land cover relationship</i>	34
2.4. <i>Bioclimate-other climatic classifications relationship</i>	34
2.5. <i>Climatic diversity analyses</i>	35
3. Results	36
3.1. <i>Bioclimatic mapping</i>	36
3.2. <i>Bioclimatic-land cover and other classification relationships</i>	40
4. Discussion	41
5. Literature cited	45
<i>Capítulo III. Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del Estado de Michoacán, México</i>	53
<i>Resumen</i>	54
1. Introducción	54
2. Zona de estudio	58

3. Material y método	60
4. Resultados	64
5. Discusión y conclusiones	68
6. Literatura citada	72
<i>Capítulo IV. Predicción de patrones de vegetación a través de atributos del paisaje: Una alternativa para valorar la biodiversidad.</i>	82
1. Introducción	83
2. Métodos	85
2.1. Área de estudio	85
2.2. Elementos integradores del paisaje	87
2.2.1. Isobioclimas	87
2.2.2. Geoformas	87
2.2.3. Geología	88
2.2.4. Vegetación	88
2.2.5. Comunidades arbóreas	89
2.3. Expresión cartográfica: Tipos de vegetación (Comunidades arbóreas)	89
3. Resultados.	90
3.1. Comunidades arbóreas	90
3.2. Relación comunidades arbóreas vs componentes geofísicos del paisaje	92
4. Discusión y conclusiones	94
5. Literatura citada	96
<i>Capítulo V. Discusión y conclusiones generales</i>	104
Literatura citada	110
<i>Anexo 1. Principales índices bioclimáticos utilizados en México</i>	112
Literatura citada	118



La presente disertación aborda una aproximación innovadora al estudio del clima. Actualmente, este tópico ha tomado gran relevancia mundial, debido principalmente a las evidencias científicas de cambio climático. Ante esto último, se hace imperante profundizar en el tema desde la adquisición de información hasta las nuevas propuestas de clasificación. Así, en las siguientes páginas el lector encontrará las fortalezas que se obtuvieron de utilizar un modelo novedoso como lo es la Bioclimatología, el cual toma sus insumos de datos climatológicos de los momentos en que las plantas presentan un grado de estrés importante (provocado principalmente por eventos de precipitaciones o temperaturas extremas). Para la proyección del modelo, el estudio de la bioclimatología en el estado de Michoacán contribuyó, entre otras cosas, a obtener una caracterización más detallada del territorio, además de que facilitó la espacialización de las diversas categorías que integran este sistema mediante la creación de modelos espacialmente explícitos.

En el capítulo uno se presenta una visión del contexto general en el cual se encuentra el estudio de la bioclimatología. En este apartado se presenta, además del planteamiento del problema, una breve descripción de las principales clasificaciones climáticas empleadas en México y el objetivo general de la presente disertación. Con esta introducción, el lector se familiarizará con el tema y le ayudará a interpretar de mejor manera las siguientes secciones.

La propuesta de crear una cartografía climática como un nuevo método para evaluar los efectos del cambio climático fue abordada en el capítulo dos. Así, el mapa que se muestra en esta sección le ayudará a identificar patrones climáticos a lo largo de gradientes altitudinales, además de mostrar su expresión corológica en un territorio que es sumamente complejo en todos los aspectos. Adicionalmente, notará que la rigurosa metodología utilizada en este apartado hace posible, que en un futuro próximo se identifiquen espacialmente las modificaciones de la distribución de los climas en el territorio conforme a las proyecciones de cambio climático.

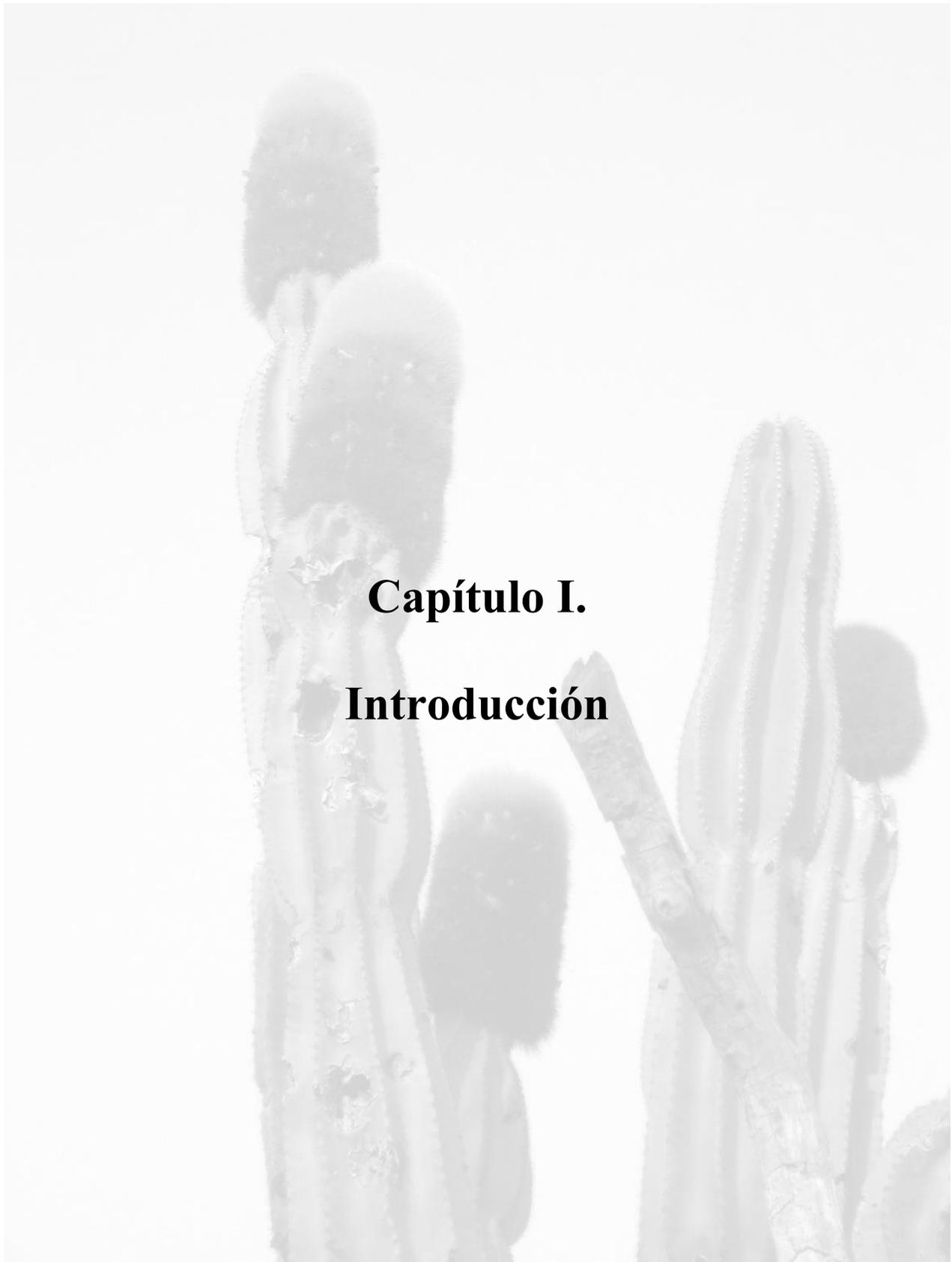
Los capítulos tres y cuatro estuvieron encaminados a predecir, por un lado, patrones de cubierta vegetal oriunda, y por otro, patrones de distribución de comunidades arbóreas. En el primer caso,

la predicción se basó en rasgos climáticos, geológicos, geomorfológicos y ecológicos, donde cada uno de ellos fue ordenado mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Las capas prioritarias para esta sección fueron las proporcionadas por el clima (resultado del mapa del capítulo dos de la presente tesis) y la capa del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación de INEGI. La jerarquización de las capas y su análisis por medio de lógica booleana, demostraron ser un proceso consistente y replicable para reconstruir patrones de la cubierta vegetal oriunda. Para el segundo caso, se identificaron áreas probables de distribución de vegetación, que a diferencia del capítulo anterior, solo advirtió categorías que son descritas mediante percepción remota. En este apartado se identificará una metodología más compleja, que expone el uso de información tanto geofísica como biológica. El resultado de lo anterior fue el siguiente: se reconocieron comunidades arbóreas producto de su estrecha relación con los elementos del clima; se identificó la correlación existente entre componentes geofísicos y elementos bióticos (representados por comunidades arbóreas) y se desarrolló un mapa que reflejó la distribución potencial de las comunidades arbóreas.

Por último, en el capítulo cinco está integrado por la discusión y conclusiones generales de esta disertación. En esta parte del escrito le muestro una reflexión general de lo conllevó el estudiar y poner a la bioclimatología como actor principal de esta obra. Asimismo, se hace hincapié de las principales aportaciones y enseñanzas que nos dejaron estas investigaciones y los retos venideros que trae consigo el haber abierto esta puerta de la ciencia.

Espero que esta tesis sea de utilidad y aporte información valiosa para los diversos objetivos de investigaciones relacionadas con el tema.

Atentamente, Luis Fernando Gopar Merino



Capítulo I.
Introducción

1. Una perspectiva general del estudio del clima

El clima es una temática atendida por la ciencia desde su origen (Bennett, 1869; Bonan, 2008), sin embargo, es en las últimas décadas que el tema toma importancia mundial. Los cambios drásticos registrados en las mediciones de los componentes del sistema climático (temperatura, humedad, precipitación, viento, radiación solar, luz, presión atmosférica, etc.) (McGuffie & Henderson-Sellers, 2005) han hecho que estudiosos del medio ambiente (SCBD, 2009), de temas sociales (Pardo & Rodríguez, 2010) e incluso los relacionados con la formulación de políticas públicas (Gough, 2011), estén atentos a los hallazgos y mediciones de sus diversos componentes día tras día.

El ser humano en su constante búsqueda de conocimiento ha catalogado los eventos que investiga y ha creado diversas clasificaciones para comprender de manera sencilla y ordenada los sucesos que ocurren en la Tierra. La temática relacionada con el clima no ha sido la excepción. Las diversas clasificaciones climáticas, en su intento de tener una aplicabilidad mundial buscaron una organización sistemática que aplicaron, en muchos casos, criterios replicables. No obstante, a pesar de lo anteriormente mencionado, es propio que cada una de ellas refleje la realidad del sitio donde fue gestada ocasionando que las diversas clasificaciones tuvieran poca o nula efectividad en otras regiones del planeta (Sara del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008).

Las principales propuestas de clasificación climática hicieron evidente el impacto de los elementos meteorológicos sobre la superficie terrestre, los cuales se ven mayormente reflejados en la vegetación (Box, 1996; Foley, Levis, Costa, Cramer, & Pollard, 2000; Sykes, 2009). Las características estructuro-funcionales de las plantas son una innegable muestra de la co-evolución establecida entre los componentes del sistema climático con los elementos biológicos (Bonan, 2008; Box, 1996; Walter, 1985). Es por este argumento que en su mayoría las diversas clasificaciones climáticas han tomado a la vegetación como parte fundamental de las diferentes categorías que las integran (Adams, 2010; Foley et al., 2000; Sánchez & Garduño, 2008). No obstante, los productos finales de sus investigaciones suelen ser locales, mostrando las bondades de un área en particular y con una pobre caracterización territorial. Ante esto último, se hace necesario la construcción de modelos espacialmente explícitos que apoyen la identificación, de

manera gráfica y a diferentes escalas (tanto espaciales como temporales), de los diversos eventos que ocurren en la superficie terrestre (Allen, Wang, & Crawford, 2013; Chuvieco, 2008; Van-Lynden & Mantel, 2001).

Las nuevas tecnologías, particularmente la Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han contribuido en la provisión de datos espaciales a diversas escalas, ayudando en la evaluación, diseño e implementación de estudios de conservación, restauración y manejo de los recursos naturales a nivel global (Chuvieco, 2008; Foody, 2008). Adicionalmente, se destacan las investigaciones realizadas referente al clima (Bai et al., 2014), los tipos de cubiertas de vegetación (J. Mas et al., 2004), la topografía (Pérez, Mas, Velázquez, & Vázquez, 2008) y la geomorfología (Bocco, Mendoza, & Velázquez, 2001) entre otros más. La capacidad de análisis, integración y obtención de modelos espacialmente explícitos mediante el uso de un SIG, ha ayudado a mostrar el impacto que causan las actividades humanas y los fenómenos naturales sobre la superficie terrestre (Bocco et al., 2001; Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2011). Así, el objetivo del presente capítulo es mostrar un panorama general del contexto en el cual está insertada la propuesta bioclimática formulada por Rivas-Martínez et al. (2011), clasificación climática sobre la cual fue construida la presente disertación.

2. Planteamiento del problema

La distribución de la vida sobre la Tierra, las adaptaciones morfofisiológicas de los diversos organismos, resultado de la evolución y la extinción de muchas especies, tienen que ver en gran medida con la estrecha relación que guardan con el clima a lo largo de la historia de nuestro planeta (Bonan, 2008; Kabat et al., 2004; Nogués-Bravo & Rahbek, 2011). El conocer, cuantificar y saber dónde se localiza la riqueza biológica del planeta han sido metas perseguidas a diferentes escalas espaciales y temporales. Así, se ha podido identificar a nivel local, el patrimonio de especies presentes en un lugar (diversidad alfa), las compartidas con otro sitio (diversidad beta) y las que pueden existir en una región determinada (diversidad gama) (Whittaker, Willis, & Field, 2001; Whittaker, 1960).

La vegetación ha sido uno de los grupos con mayor énfasis en los estudios mencionados previamente. El interés en las plantas se ha centrado, en que han sido, son y serán la principal fuente de recursos naturales para el hombre. Las plantas han jugado un papel fundamental en el moldeamiento del paisaje, son el hábitat de otros grupos de organismos y uno de los principales elementos reguladores del clima sobre el planeta (Alcamo et al., 2003; Bonan, 2008; Kabat et al., 2004). No obstante en las últimas décadas, el rápido grado de perturbación de las comunidades vegetales y la modificación de los diferentes ciclos biogeofísicos provocada principalmente por las actividades humanas (Benning, LaPointe, Atkinson, & Vitousek, 2002; Lambin & Meyfroidt, 2010), hace necesario evaluar de manera rápida y eficaz los recursos bióticos del planeta.

El clima, de acuerdo a varios autores (p. ej. Larcher, 2003; Walter, 1985), es el principal regulador de la estructura, función y distribución de la vegetación. Esta relación permite evaluar, de manera indirecta, la diversidad de la vegetación. No obstante, los diversos sistemas clasificatorios climáticos, como se planteó en la sección anterior, tienden a presentar problemas de categorización fuera de la zona de origen, ocasionando con ello su poca o nula efectividad al tratar de aplicarlos para los fines mencionados. Así, la presente disertación evaluó la propuesta climática realizada por Rivas –Martínez et al. (2011) por considerarse que aporta los elementos necesarios para poder resolver el problema de la poca aplicabilidad mundial. Adicionalmente, la inexacta y en ocasiones inexistente cartografía climática es un tema para el cual la presente investigación propone una metodología confiable y replicable que permite ilustrar espacialmente dónde que ocurren las diversas categorías climáticas. Asimismo, esta propuesta se validó mediante el indicador más afín a los climas, la vegetación.

Es preciso mencionar que la investigación se llevó a cabo en el estado de Michoacán, México. Dicha entidad federativa está caracterizada por tener serios problemas sociales y ambientales (Campos et al., 2012). No obstante, Michoacán se caracteriza por ser uno de los estados de la República Mexicana que cuenta con una alta diversidad biológica, resultado de su extraordinaria variedad geomorfológica y ser una zona de contacto de dos zonas biogeográficas: la Neártica y la Neotropical (Morrone, 2010; Villaseñor, 2005). Así, el fin último que sigue el presente estudio, es

el de generar información base que aporte elementos puntuales para la caracterización, planeación y restauración del patrimonio natural dentro del estado.

3. Antecedentes

3.1. Principales propuestas climáticas utilizadas en México

3.1.1. Sistema de clasificación Climática de Köppen (modificado por García)

La clasificación climática de Köppen fue divulgada, en su versión final, en el año de 1936 (Sara del Río, 2005; García, 2004). Su propuesta se basa primordialmente en el cálculo estadístico de valores anuales de datos atmosféricos de temperatura y precipitación. No obstante, el autor consideró a las plantas como un elemento importante en la definición de fronteras entre climas, por lo que ciertas especies clave o grandes formaciones vegetales fueron usadas para definir regiones climáticas (Sara del Río, 2005; García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). Esta clasificación, en general, está integrada por cinco grandes categorías definidas por letras mayúsculas que van de la “A” a la “E”. A su vez, cada clase climática presenta una subdivisión, dando como resultado el establecimiento de 13 tipos climáticos (Sara del Río, 2005; García, 2004) (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías climáticas de Köppen

Símbolo clima	Definición	Símbolo subtipo	Definición
A	Tropical	Af	Clima de selva
	lluvioso	Aw	Clima de sabana
B	Seco	BS	Clima de estepa
		BW	Clima de desierto
C	Templado lluvioso	Cw	Clima sónico
		Cs	Clima mediterráneo o etesio
		Cf	Clima templado
		Cfa	Clima virginiano húmedo
		Cfb	Clima de las hayas
D	Boreal	Dw	Clima transbaicálico o continental boreal

		Df	Clima ruso canadiense, de los abedules, de los pinos u oceánico boreal
E	Frío o polar	ET	Clima de tundra
		EF	Clima de hielos perpetuos

La propuesta climática de Köppen ha contado con gran aceptación internacional y ha sido usada como clasificación base en varias naciones entre las cuales se encuentra México. Sin embargo, este sistema contempla únicamente variantes climáticas inducidas por transiciones latitudinales y no contempla aquellas provocadas por variaciones altitudinales (Sara del Río, 2005; García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). México cuenta con un territorio geomorfológicamente accidentado presentando grandes cadenas montañosas, lo que ocasiona que en distancias relativamente cortas las condiciones climáticas cambien drásticamente (Sara del Río, 2005; García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). Por este motivo, gran parte de la República Mexicana no se ajusta a la propuesta original realizada por Köppen; ejemplo de esto es el hecho de que en la propuesta original los climas templados (los de tipo “C”) y fríos (los tipos “E”) no aparezcan en las latitudes tropicales. Adicionalmente, las grandes cadenas montañosas de nuestro país crean una barrera natural en el altiplano, lo que principalmente provoca, la condición seca en gran parte del territorio mexicano (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008).

Para el año de 1964, Enriqueta García propuso una serie de modificaciones al sistema clasificatorio de Köppen con el fin de resolver los problemas que generaban los puntos mencionados en el párrafo anterior a la aplicación del sistema clasificatorio en México. García resolvió la representación de las zonas secas en la región central de México utilizando la distribución de la planta *Larrea tridentata* (comúnmente llamada la gobernadora), ya que se ajusta a las zonas descritas como con climas secos (BW) en la propuesta original. Con base a esto último, se agregaron valores intermedios, tomando en cuenta a la vegetación para poder distinguir clases diferentes de climas secos en los previamente identificados como templados (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). Adicionalmente, García incluyó un mapa de los climas en la República Mexicana a una escala de 1: 1,000,000, donde muchas de las fronteras climáticas fueron delimitadas por la presencia de ciertas formaciones vegetales. Así, la propuesta de Köppen modificada por García para México siguió mayormente los rasgos y símbolos característicos de la

fuente original, además de agregar algunas modificaciones estadísticas para poder identificar variantes climáticas que son requeridas en un país tan geodiverso como México.

3.1.2. Sistema de clasificación Climática de Thornthwaite

El sistema clasificatorio climático propuesto por Thornthwaite fue publicado a la par de las investigaciones realizadas por Köppen (Thornthwaite, 1931, 1948). Thornthwaite se percató que la clasificación propuesta por Köppen no tenía aplicabilidad mundial, ya que las premisas propuestas por el científico ruso sustentaban una perfecta aproximación con el sitio donde las desarrolló y por lo tanto, las categorías sugeridas en su clasificación no eran compatibles con tipos de vegetación templada cuando esta se hallaba en regiones tropicales (Sánchez & Garduño, 2008; Thornthwaite, 1931, 1948). Asimismo notó que no solo los factores de precipitación y temperatura eran los elementos más importantes para el establecimiento de la vegetación, sino que además la eficacia de la precipitación, representada esta como la disponibilidad del agua en un sitio, era un elemento importante para el establecimiento de las plantas. Por todo lo anterior, propuso 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 (Sara del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008; Thornthwaite, 1931, 1948). Los factores de temperatura media mensual y latitud del sitio que se quiera estudiar, son los elementos que determinan el periodo diario de la radiación, componente que influye directamente en la ETP (Sara del Río, 2005; Thornthwaite, 1931, 1948). La propuesta establece que una vez obtenidos los valores anuales de ETP junto con los balances hídricos (obtenidos de la diferencia Precipitación – ETP) es posible dilucidar una de las trece clases fundamentales de su propuesta de clasificación. No obstante, esta puede subdividirse en más categorías debido a las variaciones de cantidad, duración, falta o exceso de agua en el sistema (Sara del Río, 2005; Thornthwaite, 1931, 1948).

Esta clasificación fue usada para los Estados Unidos y México, mostrando buenos resultados para el primer país (en los tipos de vegetación templado) y poco aceptables para el segundo (en especial en las regiones con vegetación tropical) (Thornthwaite, 1931). No obstante, a pesar de contar con mapas de la distribución climática (de las dos naciones mencionadas anteriormente) y de no haber

utilizado la vegetación como parte de su sistema clasificatorio, la propuesta no ha sido bien vista para su uso en otras regiones del mundo. Lo anterior es debido a su complejo manejo, la poca confiabilidad que se tiene en la captura de datos provenientes de las estaciones meteorológicas y la escasa o nula eficacia que presenta en zonas tropicales y semiáridas (Sara del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008).

En México son escasos los trabajos en que el presente sistema clasificatorio ha sido utilizado. Las investigaciones en las cuales se hace mención de este sistema, no presentan, como objeto de estudio al clima y principalmente lo emplean para caracterizar sus áreas de estudio sin profundizar mucho en ello. Ejemplo de lo anterior es la clasificación climática realizada para el estado de Tabasco por Ruiz-Álvarez et al. (2012). Es importante, sin embargo, mencionar que la metodología propuesta por Thornthwaite para estimar el balance hídrico de una región es una de las más utilizadas en trabajos de corte meteorológico, climático o de caracterización ambiental en diversas áreas de México (p. ej. Etchevers, Gómez, Monterroso, & Tinoco, 2008; Gómez & Monterroso, 2008; Rivas, Navarro, Penas, & Costa, 2011; Santillán, Dávila, De Anda, & Díaz, 2013).

3.1.3. Sistema de clasificación Climática de Holdridge

Leslie R. Holdridge fue un investigador de origen estadounidense que realizó sus principales aportes a la climatología trabajando en Costa Rica (Holdridge, 1967). Su propuesta climática asume que las características fisonómicas y estructurales de la vegetación pueden correlacionarse estrechamente con parámetros macroclimáticos. Los límites climáticos descritos en su investigación están estrechamente relacionados con tres factores biofísicos: la precipitación media anual, la evapotranspiración y la biotemperatura. La combinación de estos tres parámetros fue la base en la que se apoyó para establecer siete zonas latitudinales (definidas por intervalos de biotemperatura) y seis pisos altitudinales (que van del Ecuador a los Polos). Asimismo, su propuesta definió nueve provincias de humedad, que con la intersección de las dos anteriores, delimitaron un conjunto de celdillas correspondientes a los espacios climáticos de distintos tipos fisonómicos-estructurales de vegetación denominados “zonas de vida” (Sara del Río, 2005; Holdridge, 1967).

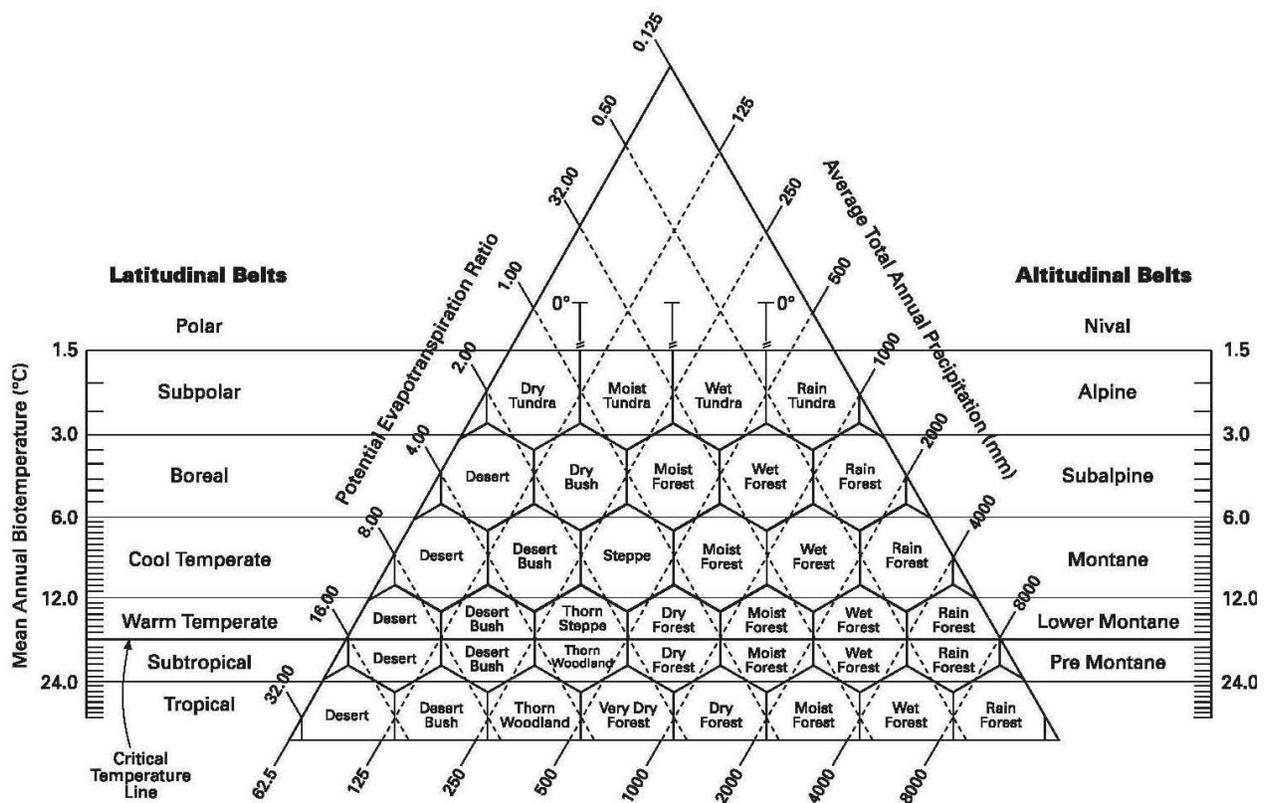


Figura 1. Diagrama planteado por Holdridge para identificar “zonas de vida” en su propuesta climática (figura tomada de Adams, 2010).

La propuesta realizada por este autor mostró eficacia en zonas tropicales y subtropicales, no obstante, conforme las zonas de estudio se alejaban del trópico, el modelo climático mostraba deficiencias (Adams, 2010; S. del Río, Penas, & Fraile, 2005; Sánchez & Garduño, 2008).

En México, el sistema clasificatorio de Holdridge ha sido utilizado principalmente para describir, a grandes rasgos, el clima de las zonas donde realizó sus primeras aproximaciones. La particularidad de estas investigaciones fue que se realizaron en áreas con presencia de vegetación tropical, como por ejemplo Miller y Kauffman (1998) en Chamela, Jalisco, o en el realizado por González-Iturbe et al., (2002) para el estado de Yucatán. En casos particulares, la metodología de este sistema clasificatorio fue la base para obtener los climas de una región o del país, como ejemplo las investigaciones realizadas por Gutiérrez-García y Ricker (2011) para la zona de los Tuxtlas,

Veracruz, y los llevados a cabo por la SEMARNAP (1997) con el fin identificar los bosques tropicales presentes en el territorio nacional.

3.1.4. Sistema de clasificación Climática de Rivas-Martínez, Rivas y Penas

El modelo climático propuesto por Rivas-Martínez y colaboradores (2011) fue diseñado, en un principio, para instaurar una nueva clasificación climática para España. Los autores han ido ajustando y modificando los índices climáticos de su propuesta con el fin de que la presente tenga aplicabilidad mundial. La premisa fundamental de esa clasificación climática fue la de encontrar una estrecha correlación entre variables meteorológicas (con valores principalmente de temperatura y precipitación) con unidades del paisaje (representados principalmente por comunidades vegetales) (Rivas-Martínez et al., 2011). Los índices climáticos, de los que parte la categorización, consideran periodos de tiempo en que ciertos valores meteorológicos afectan fisiológicamente, de manera extrema, a las plantas. Así, el detectar los momento de mayor estrés que la vegetación afronta por la falta o exceso de lluvia y por la constante 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 (S. del Río et al., 2005; Peinado, Monje, & Martínez, 2008; Rivas-Martínez et al., 2011). Con base en lo anterior, los autores llaman a la propuesta como Bioclimatología y ha sido esta la seleccionada para la realización de la presente tesis de investigación. 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) (Ver Anexo 1).

En México, el estudio de este sistema clasificatorio ha tenido aproximaciones de manera regional, caracterizando bioclimáticamente las zonas investigadas a partir de la información puntual de estaciones meteorológicas. Destacan los trabajos realizados por Macías (Macías, Peinado, Giménez, Aguirre, & Delgadillo, 2014; Macías, 2009), en el que se realizó la caracterización bioclimática de toda la costa del pacífico norteamericano, desde Alaska, Estados Unidos, hasta el estado de Chiapas, en México; Peinado et al., (Peinado, Macías, Aguirre, Delgadillo, & Díaz,

2009; Peinado, Macías, Aguirre, & Rodríguez, 2010; Peinado, Macías, Ocaña-Peinado, Aguirre, & Delgadillo, 2010) que actualiza el trabajo previo realizado por Macías (2009) analizando con mayor detalle la relación clima – vegetación en áreas correspondientes al pacífico mexicano; Giménez et al., (2004), Giménez et al., (2011) y Medina et al. (2012), a la par de realizar estudios de vegetación, describen la bioclimatología de los sitios estudiados a partir de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona. No es, sino hasta el trabajo de Giménez et al. (2013), que además de analizar la relación clima – vegetación, se realiza una primera aproximación cartográfica de termotipos y ombrotipos presentes en la Sierra Madre Occidental.

4. Consideraciones finales

No obstante los esfuerzos anteriores, se hace imperante tener estudios que reflejen de manera explícita de dónde ocurren los fenómenos climáticos sobre la superficie terrestre, el cómo estos pueden ser validados y cómo el resultado de lo anterior puede ayudar al manejo, uso, preservación y restauración del medio ambiente. Así, el objetivo general de la presente tesis, es el de documentar y proyectar patrones de distribución de formaciones vegetales a partir de modelos bioclimáticos en regiones intertropicales de alta complejidad geocológica. Lo anterior trae consigo el diseño de una cartografía de la diversidad de climas presentes en el estado de Michoacán aplicando un método replicable. Adicionalmente, como resultado del anterior punto, se dedujeron tipos de cubiertas de vegetación con base en información obtenida mediante percepción remota. Finalmente, se utilizaron los climas identificados y cartografiados como línea base para la predicción de tipos de vegetación.

5. Literatura citada

- Adams, J. (2010). *Vegetation-Climate Interactions. How Plants Make the Global Environmental*. (2nd ed.). Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd.
- Alcamo, J., Ash, N., Butler, C., Callicott, B., Capistrano, D., Carpenter, S., ... Zurek, M. (2003). *Ecosystems and human well-being*. (W. R. Institute, Ed.). Washington, D.C., USA: Island Press. Retrieved from <http://www.millenniumassessment.org/en/Index-2.html>
- Allen, T., Wang, Y., & Crawford, T. (2013). Remote sensing of land cover dynamics. In J. Shroder & M. P. Bishop (Eds.), *Treatise on geomorphology*. (pp. 80–102). San Diego, California: Academic Press. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00046-4>
- Bai, Y., Kaneko, I., Kobayashi, H., Kurihara, K., Takayabu, I., Sasaki, H., & Murata, A. (2014). A Geographic Information System (GIS)-based approach to adaptation to regional climate change: a case study of Okutama-machi, Tokyo, Japan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *19*(5), 589–614. <http://doi.org/10.1007/s11027-013-9450-6>
- Bennett, A. (1869). On the Fertilisation of Winter-Flowering Plants. *Nature*, *1*(1), 11–13. <http://doi.org/10.1038/001011a0>
- 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. <http://doi.org/10.1073/pnas.162372399>
- Bocco, G., Mendoza, M., & Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, *39*(3-4), 211 – 219. <http://doi.org/10.1016/0169-555X>
- Bonan, G. (2008). *Ecological climatology* (2nd ed.). New York, USA: Cambridge University Press.

- Box, E. O. (1996). Plant functional types and climate at the global scale. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 309–320. <http://doi.org/10.2307/3236274>
- Campos, M., Velázquez, A., Verdinelli, G. B., Skutsch, M., Juncà, M. B., & Priego-Santander, Á. G. (2012). An interdisciplinary approach to depict landscape change drivers: A case study of the Ticuiz agrarian community in Michoacan, Mexico. *Applied Geography*, 32(2), 409–419. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.004>
- Chuvienco, E. (2008). *Teledetección ambiental*. (3rd ed.). Barcelona: Ariel. Retrieved from <http://www.slideshare.net/jaiflo7503/teledeteccion-ambiental-listo>
- del Río, S. (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. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.06.005>
- Etchevers, J., Gómez, J., Monterroso, A., & Tinoco, J. (2008). *Formulación de indicadores para evaluar y monitorear la desertificación en México*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo. Retrieved from http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/indicadores_evaluar_desertificacion.pdf
- 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. [http://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[1620:IDVCWG\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1620:IDVCWG]2.0.CO;2)
- Foody, G. (2008). GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 32(2), 223–235. <http://doi.org/10.1177/0309133308094656>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5th ed.).

- México, D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- Giménez, J., & González, O. (2011). Pisos de vegetación de la Sierra de Catorce y territorios circundantes (San Luis Potosí). *Acta Botánica Mexicana*, (94), 91–123. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57415694004>
- Giménez, J., Macías, M., & Gopar-Merino, F. (2013). Bioclimatic belts of Sierra Madre Occidental (Mexico): A preliminary approach. *International Journal of Geobotanical Research*, 3(1), 19–35. <http://doi.org/10.5616/ijgr130002>
- Giménez, J., & Ramírez, I. (2004). Análisis fitosociológico de los bosques de oyamel [Abies religiosa (H.B.K.) Cham. & Schlecht.] de la Sierra de Angangueo, Región Central de México. *Fitosociologia*, 41(1), 91–100. Retrieved from <http://www.scienzadellavegetazione.it/sisv/documenti/Articolo/pdf/148.pdf>
- Gómez, J., & Monterroso, A. (2008). Caracterización del índice de aridez en México usando dos alternativas de estimación de la evapotranspiración potencial y escenarios de cambio climático. In U. de Salamanca (Ed.), *Memorias del 8o. Congreso de la Asociación Española de Climatología* (pp. 105–114). Salamanca, España: Asociación Española de Climatología. Retrieved from http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/C_Indice_aridez_Mexico.pdf
- González-Iturbe, J., Olmsted, I., & Tun-Dzul, F. (2002). Tropical dry forest recovery after long term Henequen (sisal, *Agave fourcroydes* Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 167(1-3), 67–82. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00689-2](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00689-2)
- Gough, I. (2011). *Climate change and public policy futures*. London, UK: British Academy.

Retrieved from <http://www.britac.ac.uk/policy/Climate-change-and-public-policy-futures.cfm>

Gutiérrez-García, G., & Ricker, M. (2011). Climate and climate change in the region of Los Tuxtlas (Veracruz, Mexico): A statistical analysis. *Atmósfera*, 24(4), 347–373. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56521269001>

Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. Retrieved from <http://cct.or.cr/publicaciones/Life-Zone-Ecology.pdf>

Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P., Gash, J., Bravo de Guenni, L., Meybeck, M., ... Lutkemeier, S. (2004). *Vegetation, water, humans and the climate*. (K. Pavel, C. Martin, D. Paul A., G. John H. C., B. de G. Lelys, M. Michel, ... L. Sabine, Eds.) (1st ed.). Germany: Springer.

Lambin, E., & Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27, 108–118. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.003>

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology* (4th ed.). Berlin, Germany: Springer. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BgtzD4frr98C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Larcher,+W.+2003.+Physiological+Plant+Ecology.+4th+ed.+Springer.+Berlin&ots=11YZOjwg3M&sig=82lhT-L1UJURsvr73AyPMYHy31o#v=onepage&q&f=false>

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2011). *Geographic information. Systems & science* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Ltd.

Macías, M. (2009). *Estudio de las relaciones entre zonobiotomas, 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. Retrieved from <http://www1.inecol.edu.mx/abm/articulos/Acta109%28133-165%29.pdf>

Mas, J., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 249–261. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>

McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2005). *A Climate Modelling Primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/0470857617>

Medina, C., Gopar-Merino, F., Giménez de Azcárate, J., & Velázquez, A. (2012). Análisis bioclimático y estudio de la vegetación del transecto Pico del Tancítaro-Valle de Apatzingán, Michoacán, México. In J. F. Mas & G. Cuevas (Eds.), *Memorias XIX Reunión Nacional SELPER. CIGA-UNAM. Morelia, México*. (pp. 293–301). Morelia, Michoacán: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.

Miller, P., & Kauffman, J. (1998). Effects of slash and burn agriculture on species abundance and composition of a tropical deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 103(2-3), 191–201. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00180-1](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00180-1)

Morrone, J. (2010). Fundamental biogeographic patterns across the Mexican Transition Zone: an evolutionary approach. *Ecography*, (33), 355–361. <http://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06266.x>

Nogués-Bravo, D., & Rahbek, C. (2011). Ecology. Communities under climate change. *Science (New York, N.Y.)*, 334(6059), 1070–1071. <http://doi.org/10.1126/science.1214833>

Pardo, M., & Rodríguez, M. (2010). *Cambio climático y lucha contra la pobreza*. (M. Pardo & M. Rodríguez, Eds.). Madrid, España: Siglo XXI.

Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., Delgadillo, J., & Díaz, G. (2009). Clasificación bioclimática

- de la cuenca del Pacífico de México. *Acta Botánica Mexicana*. Retrieved from <http://es.scribd.com/doc/39574964/Manuscrito-Peinado-Et-A1-2009>
- Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., & Rodríguez, J. (2010). Bioclimate-Vegetation Interrelations in Northwestern Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 55(3), 311–322. <http://doi.org/10.1894/DW-121.1>
- Peinado, M., Macías, M., Ocaña-Peinado, F., Aguirre, J., & Delgadillo, J. (2010). Bioclimates and vegetation along the Pacific basin of Northwestern Mexico. *Plant Ecology*, 212(2), 263–281. <http://doi.org/10.1007/s11258-010-9820-z>
- Peinado, M., Monje, L., & Martínez, J. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla - La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto centenario. Retrieved from http://foto.difo.uah.es/geobotanica/acta_botanica_mexicana.html
- Pérez, A., Mas, J., Velázquez, A., & Vázquez, L. (2008). Modeling vegetation diversity types in Mexico based upon topographic features. *Interciencia*, 33(2), 88–95.
- Rivas, S., Navarro, G., Penas, A., & Costa, M. (2011). Biogeographic Map of South America. An initial advance. *International Journal of Geobotanical Research*, 1(1), 21–40. <http://doi.org/10.5616/ijgr110002>
- Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg110001>
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., Ontiveros, R., & López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad Y Ciencia*, 28(1), 1–14. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v28n1/v28n1a1.pdf>
- Sánchez, N., & Garduño, R. (2008). Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *ContactoS*, (68), 5–10. Retrieved from <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/index.php/Numeros-anteriores.html>

- Santillán, E., Dávila, G., De Anda, J., & Díaz, J. (2013). Assessment of hydric balance through climatic variables, in the Cazonas River Basin, Veracruz, Mexico. *Ambiente Y Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(3), 104–117. <http://doi.org/10.4136/ambiente-y-agua.1147>
- SCBD. (2009). *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Report of the second ad hoc technical expert group on biodiversity and climate change*. Montreal, Canadá. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf>
- SEMARNAP. (1997). *México. Primera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. México, D.F.: Desarrollo Gráfico Editorial. Retrieved from http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=32
- Sykes, M. (2009). Climate Change Impacts: Vegetation. In *Encyclopedia of Life Sciences*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021227>
- Thornthwaite, C. (1931). The Climates of North America: According to a New Classification. *Geographical Review*, 21(4), 633–655. <http://doi.org/10.2307/209372>
- Thornthwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <http://doi.org/10.2307/210739>
- Van-Lynden, G. W. J., & Mantel, S. (2001). The role of GIS and remote sensing in land degradation assessment and conservation mapping: some user experiences and expectations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 61–68. <http://doi.org/10.1016/S0303-2434>
- Villaseñor, L. (Ed.). (2005). *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de caso*. Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Retrieved

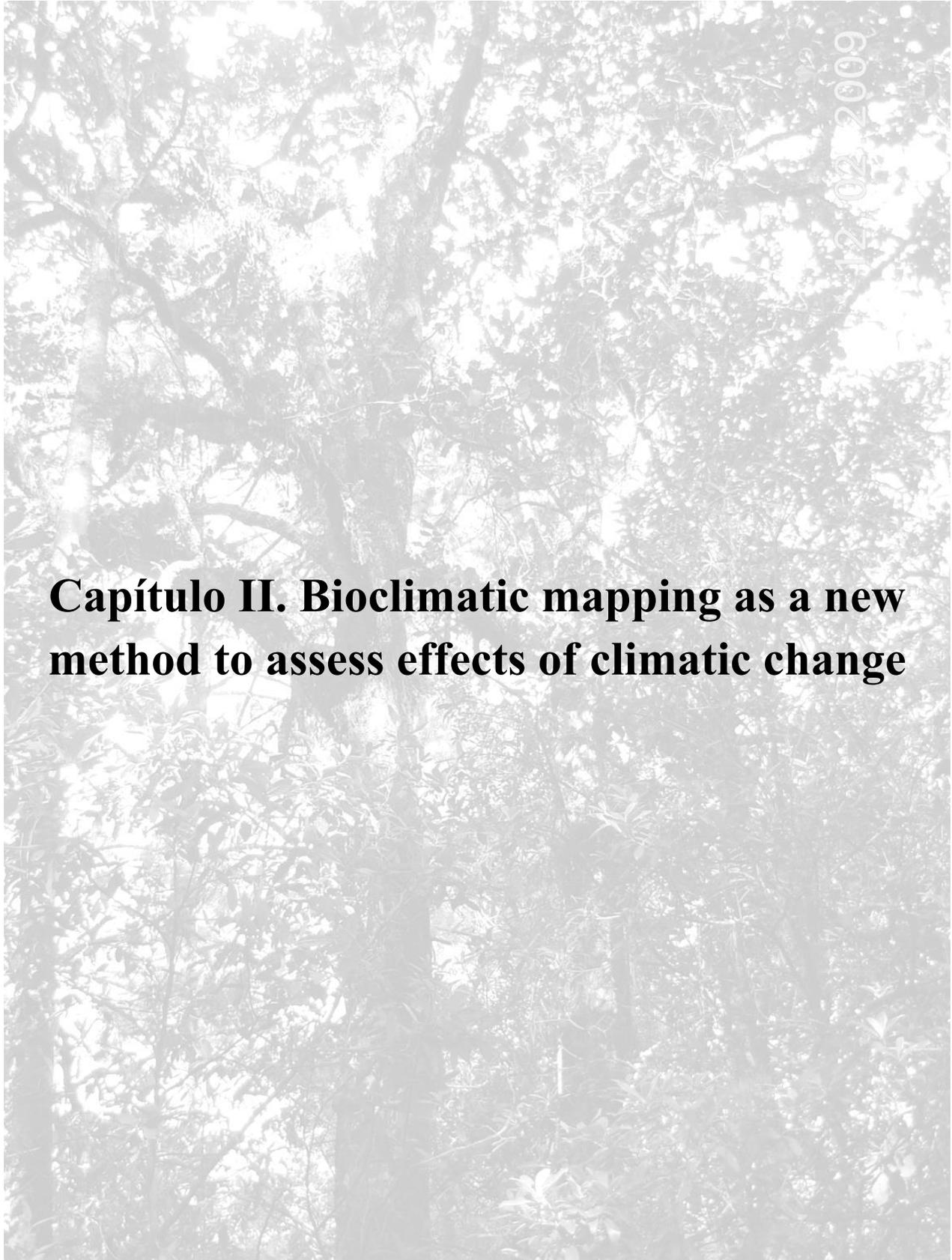
from

http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/EE_MICHOACAN_2005.pdf

Walter, H. (1985). *Vegetation of the Earth and ecological systems of the geobiosphere*. (3rd ed.). Berlin, Germany: Springer.

Whittaker, R. (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338. <http://doi.org/10.2307/1943563>

Whittaker, R., Willis, K., & Field, R. (2001). Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 28, 453–470. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00563.x>



Capítulo II. Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change

Abstract

Rigorous mapping of climatic patterns outstands as one of the mayor issues concerning climatic change. This paper investigates the extent of the bioclimatic approach to develop a rigorous cartographic methodology to express climatic diversity patterns. Michoacan, Mexico was chosen to represent a region of complex geo-ecological layout where the Nearctic and Neotropical biogeographical realms converge. Bioclimatic indices were computed and their spatial expression was processed in a Geographic Information System. Ground verification was performed at 93 sites across the province. In addition, from 2010 until 2012, more than 2000 km of roads were surveyed to gather data on isobioclimate boundaries. In total, one macrobioclimate, two bioclimates, four thermotypes, five ombrotypes and 14 isobioclimates were distinguished in Michoacan. The Tropical pluvisesonal bioclimate was the predominant bioclimate, covering 56.17% of the province. The Tropical xeric covers 43.82% and the Tropical pluvial is practically negligible, covering 0.01% of the entire province. The relevance of the outcome is discussed in light of its potential use for assessing likely effects of climatic change.

1. Introduction

Today, climate studies represent a major scientific theme, given the undeniable effects of climate change (IPCC, 2013). Three main approaches prevail for the study of climate impacts on ecosystems, as follows: (1) a meteorological approach that focuses on monitoring climate over long periods of time with outcomes on small geographical scales (Easterling et al., 2000); (2) an environmental approach targeted at the meso-scale level to document present and future effects on biodiversity (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011); and (3) an ecological approach, largely used to depict exceptions to general meso-climatic rules, which often are restricted to large scales or specific localities (Nogués-Bravo & Rahbek, 2011; Pennisi, 2012). Regardless of the approach, a rigorous cartographic representation of climatic patterns is of extreme relevance to all. Tools such as remote sensing and geographic information systems have played a fundamental role in these cartographic endeavors (Van-Lynden & Mantel, 2001). Notwithstanding, providing a geographic representation of climatic patterns remains a challenge; especially at the meso-scale, where climate-vegetation relationships are crucial to the possible pursuit of sustainable production activities and the provision of ecosystem services such as water, agriculture, horticulture and forestry.

Previous climate classification proposals have proved to be of limited applicability to provide sound cartographic expression. Outstanding examples of these proposals include: Thornthwaite (1948), which is widely used in North America; Holdridge (1967), which is predominant in Central and South America; and García (2004), which is the most common in Mexico.

Bioclimatology is an emerging approach focused at understanding, depicting and portraying the climate-vegetation relationship at the meso-scale. According to Rivas-Martínez et al. (2011), bioclimatology is structured in three organization levels, namely: macrobioclimates (Polar, Boreal, Temperate, Mediterranean and Tropical), bioclimates (28 in total) and large number of combinations of bioclimate types (thermotypes and ombrotypes). Thermotypes may be regarded as a gradient of temperature, whereas ombrotypes display a gradient of precipitation, which combined depict climatic niches so called as isobioclimates. Bioclimatology is furthermore based upon raw data for precipitation and temperature during the most extreme (dry, wet, warm or cold) months. The data are transformed into indices to provide a classification system, which depicts patterns along gradients (Rivas-Martínez, Rivas, et al., 2011; Rivas-Martínez, 2005). This approach has been rigorously applied in Temperate, Mediterranean and Boreal ecosystems (Cress, Sayre, Comer, & Warner, 2009; del Río, 2005; Gonzalo, 2010; Peinado, Monje, & Martínez, 2008), and has recently been applied to a limited number of examples in tropical areas (e.g. Navarro (1997) for Bolivia; Costa et al. (2007) for Venezuela).

Cartographic expression of climatic patterns is especially important in regions harboring large native forest land cover, because of the role they play in mitigating climate changes. In this regard, Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) have served to store, analyze, and cartographically display large amounts of data. Climatic data have also been analyzed through RS and GIS, so that changes in temporal and spatial climatic patterns and trends can be explored (del Río & Penas, 2006). A detailed review of the research on this subject has been done by Foody (2008). Nonetheless, sound, replicable cartographic expression of bioclimatic outcomes at the meso-scale is still in its infancy. One encouraging exception at a meso-scale level was conducted by del Río and Penas (2006) who carried out a thorough bioclimatic analysis and were able to

predict likely climatic changes in Spain. These authors, however, focused in portraying cartographically all levels of bioclimatic classification rather than providing spatial representation of isobioclimates as surrogates of geo-ecological complexity.

In theory, vegetation, expressed in land cover types, ought to be regarded as the response variable of climatic patterns (Whittaker, 1967). Mapping land cover types has gained large popularity due to the advance in remote sensing data availability and analytical tools (Chuvieco, 2008). Cartography of climatic types has often been subordinated to land cover types or intermingled with atmospheric data obtained at climatic stations and further interpolated (García, 2004; Rivas-Martínez, Navarro, Penas, & Costa, 2011). Sound climate mapping, however, turns scientifically challenging at regions with contrasting ecological configuration; as it is the case of Michoacán province in Mexico--which covers an area approximately the size of Costa Rica--harbors representative temperate and tropical native ecosystems (Sarukhán et al., 2009; Skutsch, Simon, Velazquez, & Fernández, 2013; Velázquez, Bocco, Romero, & Pérez Vega, 2003; Velázquez, Mas, Bocco, & Palacio-Prieto, 2010), and is comprised of a peculiar geomorphological configurations (Bocco, Mendoza, & Velázquez, 2001).

Rigorous studies aimed at providing reliable spatially explicit climatic baseline are fundamental to assess the extent of ecological impact of global changes. Along this line, the aim of this paper is to develop a methodological cartographic approach to express bioclimates as surrogates of ecological diversity at a mesoscale, in order to enhance predictions of land cover types within a geologically tropical region. The results are compared to conventional climatic zoning approaches and discussed in the light of their outreach as baseline definition for climatic change.

2. Material and methods

2.1. Study site

The province of Michoacán is located west of Mexico City and covers 58,599 km², which accounts for 3% of the country's surface area (INEGI, 2011). The study area is located within the following coordinates: 20°24' latitude North to 17°55' latitude North; and 100°04' longitude West

to 103°44' longitude West. Michoacán is mostly mountainous, and predominantly dissected by the Tepalcatepec watershed, which on the north is limited by the Transversal Neovolcanic (formed in the Quaternary period), and on the south by the Sierra Madre del Sur (formed in the Tertiary period) (Israde, 2005). Because its elevation ranges from sea level to 3840 m (Antaramián-Harutunian & Correa-Pérez, 2003), the climate varies drastically along either elevational or coastal-to-inland gradients (García, 2004). Soils are also diverse, with Leptosol, Regosol, Luvisol, Acrisol, Andosol, Vertisol and Feozem types being dominant (Cabrera, González, & Ayala, 2005).

In addition to the complex physical layout, Nearctic and Neotropical biogeographic realms converge in Michoacán (Rzedowski, 1991), leading to unusually high biodiversity (Challenger, 1998; Ramamoorthy, Bye, Lot, & Fa, 1998; Velázquez et al., 2003, 2010, 2009; L. Villaseñor & Benítez, 2005). Indeed, 80% of the tree families and 50% of the tree genera reported for Mexico occur in Michoacán (Velázquez et al., 2009). At the species level, Villaseñor and Ibarra-Manríquez (1998) reported 3,600 species of trees for Mexico while Cué-Bär et al. (2006) estimated some 845 species of trees occurring in Michoacán. Furthermore, it is estimated that over 40% of the tree species are endemic to Michoacán, of which over 45% are listed as threatened (Cué-Bär et al., 2006; Velázquez et al., 2009; Villaseñor, 2004). As a result, fully seven out of the eight tree-dominated ecosystems of Mexico occur in Michoacán, namely: coniferous forest, oak forest, mountain cloud forest, tropical dry forest, spiny forest, tropical deciduous forest, and tropical perennial forest (Carranza, 2005; Rzedowski, 2006). Additional information of biogeographical zoning and land cover types occurring in all Mexico can be found at: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

2.2. Bioclimatic cartographic expression

Our main source of data was the Digital Climatic Atlas of Mexico (DCAM). The Atlas was built primarily from climatic data reflecting the monthly and annual averages for precipitation and temperature from 1902 through 2011 (which data was obtained from the National Meteorological System, or SMN for the Spanish acronym), together with other climatic data such as

evapotranspiration and mean annual temperatures (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, & Lobato, 2012).

The climatic data of DCAM were calculated according to the methodology used in ANUSPLIN (Hutchinson 2004), the same tool that was used for the global climate data in WorldClim <http://www.worldclim.org> (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005). The surface climate data were calculated by finding the difference between the climate data for Mexico and the corresponding surface values from World Clim for the same geographical position. DCAM subjected the resulting surface climate data to quality control and data outside two standard deviations above or below the mean were eliminated. With the remaining differences, spatial interpolation was performed using Inverse Distance Weighted Interpolation (Shepard, 1968). The final layer was then calculated as the sum of all the surface climate data, plus the World Clim data, plus the interpolated surface of the differences. From this final layer, raster layers were established, with pixels approximately one square kilometer in size. More details and the raw data can be found in Fernández-Eguiarte et al. (2012).

The following bioclimatic indices (based on Rivas-Martínez, Rivas, et al., 2011) were computed. Their calculation and an explanation of their properties are thoroughly explained at Rivas-Martínez, Rivas, et al. (2011).

Io: Ombrothermic Index. $Io = (Pp/Tp)^{10}$. This index is the result of Pp (the yearly positive precipitation in mm) divided by Tp (the yearly positive temperature).

Pp: Yearly Positive Precipitation. In mm, the total average precipitation of those months whose average temperature is higher than 0°C.

Tp: Yearly Positive Temperature. In tenths of degrees Celsius, the sum of the monthly average temperature of those months whose average temperature is higher than 0°C.

Iod2: Ombrothermic index of the driest bimonth. $Iod2 = (Ppd2/Tpd2)$. This index is the result of Ppd2 (the total precipitation of the two driest months contained within the driest quarter of the year) divided by Tpd2 (the total temperature of the two driest months contained within the driest quarter of the year).

Pi: Mean annual precipitation.

To calculate bioclimatic indices representing a long period of time, the I_o , $Iod2$ and P_i , were computed for all years within the period 1902 through 2011. This gave I_o (Equation 1), $Iod2$ (Equation 2) and P_i (Equation 3), which were then computed as follows:

$$\text{Eq. 1. } I_o = \sum_{i=1}^{110} I_{oi} / 110$$

$$\text{Eq. 2. } Iod2 = \sum_{i=1}^{110} Iod2i / 110$$

$$\text{Eq. 3. } P_i = \sum_{i=1}^{110} P_{ii} / 110$$

Where: 110 is the period of 1902 to 2011; i is the index in each year.

It: Thermicity Index. $It = (T + m + M)10$; where:

T= mean annual temperature for the whole period of analysis (1902-2011).

“M” is the maximum average temperature of the coldest month, whereas “m” is the minimum average temperature of the coldest month. To compute “M” and “m”, a data base with the coldest month of every year throughout 1902-2011 was comprised, and then it was split into two subsets. One comprised all months with values above the mode and the other subset all temperature values below the mode. The first subset served as input to compute “M”, whereas the second subset was used to calculate “m”.

m= mean temperature value of the readings below the mean temperature of the coldest month throughout the period (1902-2011).

M= mean temperature value of the readings above the mean temperature of the coldest month throughout the period (1902-2011).

We used these indices for each pixel to identify preliminary outcomes, namely: macrobioclimate, bioclimate, thermotype and ombrotype. This process implied fitting every pixel, based upon its index value, into a classification scheme already developed by Rivas-Martínez, Rivas, et al. (2011). For instance, a given pixel with It value of 201.79 falls as Supratropical Thermotype, and the same pixel with a Io value of 14.46 falls as Hyperhumid Ombrotype. This classification procedure was done pixel by pixel with the aid of the GIS. Further details of the classification scheme for all ombrotypes and thermotypes threshold values are available at:http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm#2b. Pixels containing unique combinations of thermo and ombro types within the same (macro) bioclimate were clustered and referred as isobioclimates. These isobioclimates were used to depict spatial

bioclimatic patterns for the entire province of Michoacán in a raster format. Finally, the raster dataset was converted to polygon features. The scale of Bioclimatic Diversity Map of Michoacán was 1:250,000, with a minimum mapping unit of 100 hectares. The map projection was Lambert Conformal Conic, Datum WGS 1984. All these calculations, the map algebra and the cartographic representation were made using ArcGIS V9.3. It is worth-mentioning that spatial resolution of the original data remains the same as the output map produced for Michoacán province.

Ground verification was performed throughout the entire province between 2010 and 2012. A total of 93 sites covering all isobioclimates were surveyed. In addition, over 2000 kilometers of road were used to gather data on isobioclimate boundaries.

The verification procedure was based on Macías (2009), who described land cover types-isobioclimates relationship for the whole Pacific coast of Mexico. Fieldwork took place during tree flourishing periods, in other words, during the transition from winter to spring for tropical dry forest; and during the transition from autumn to winter for temperate and tropical sub-humid forests. In these periods we distinguished clear structural and physiognomic contrasts. At every site, we focused our efforts on a well conserved, representative forest patches. In addition, all tree species were noted or collected for further identification at the Instituto de Ecología-Bajío herbarium in Pátzcuaro if the species was not identified on site. If a cluster of tree species found at a given site did not fit with the land cover type-isobioclimate relationship reported by Macías (2009), then the climatic data was reviewed and recalculated to cross-check data reliability. If data were reliable, the isobioclimate obtained was regarded as appropriate, else Macías's isobioclimate proposal was used as ground truth. To reduce subjectivity, a minimum of 8 sampling sites per isobioclimate were surveyed in order to cover all climatic variability. Detailed vegetation studies at the community level and the relationship with isobioclimates is part of ongoing research and falls outside the scope of the present paper.

All 96 sites surveyed were crossed with all isobioclimate types to construct a confusion matrix (*sensu* Díaz-Gallegos et al. 2010). Map accuracy was then measured as a weighted proportion of

the isobioclimate versus the number of field sites comprising those tree species related to a specific climatic condition, according to the following algorithm proposed by Card (1982) (Equation 4).

$$\text{Eq. 4. } p_i = \pi_j n_{ij} / n_{+j}$$

Where:

π_j is the proportion of the isobioclimate j on the map,

n_{ij} is the number of sites actually comprising tree species that correspond to the isobioclimate i, but appearing on the map as category j,

n_{+j} is the marginal addition, and was computed by the following (Equation 5):

$$\text{Eq. 5. } n_{+j} = \sum_{i=1}^q n_{ij}$$

Our study aimed to reach 90 per cent coherence between field sites and isobioclimate types, as previously reported for neighboring areas (Giménez & González, 2011; Giménez & Ramírez, 2004; Peinado, Macías, Aguirre, & Rodríguez, 2010; Peinado, Macías, Ocaña-Peinado, Aguirre, & Delgadillo, 2010).

2.3. Bioclimate-land cover relationship

The land cover data base produced during 2008 by the “Instituto Nacional de Estadística y Geografía” (INEGI for the Spanish acronym) (INEGI, 2010) was used as main input to perform analysis between bioclimate and land cover types. This data base was made through landsat images interpretation taken from spring and autumn 2007 and spring 2008. Ground truth of the interpretation was conducted in autumn 2007 and spring-summer 2008. Michoacán harbors 15 natural land cover types, grouped in six land cover types (sensu Velázquez et al., 2010). The final scale of land cover data base was of 1:250,000, with a minimum mapping unit of 100 hectares and more than 2,200 polygons of natural vegetation. The land cover data base reclassified was crossed with the isobioclimatic map here obtained, using ArcGIS V 9.3. The results were summarized on graphics that indicate relationship among bioclimatic and natural land cover types expressed in percentage (anthropogenic land covers were not taken into consideration for this analysis).

2.4. Bioclimate-other climatic classifications relationship

In Mexico, climatic types have been defined based upon Köppen, adapted to local conditions by García (2004) (Table 2 in www.ciga.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=66:articulo-1&catid=13:investigacion&Itemid=265). This approach prevails so much that is the only one used by any academic and governmental institution. Its cartographic representation was developed by García (op cit.) and made digitally available at a scale 1:1,000,000 by “Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad” (CONABIO for the Spanish acronym) (CONABIO, 2008). García’s Mexican climatic map includes was used as input to be crossed with the bioclimatic data base using ArcGIS V9.3. The results were summarized on graphics that indicate relationship among bioclimatic and natural land cover types (anthropogenic land covers were not taken into consideration for this analysis).

2.5. Climatic diversity analyses

Bioclimate-land cover-other climatic classifications relationships were analysed in terms of their diversity of types harbored. For that purpose, Shannon-Wiener (Magurran, 1988) diversity index was computed after map crossing took place. Shannon-Wiener's index was calculated as follows (Equation 6):

$$\text{Eq. 6. } H' = -\sum p_i \ln p_i$$

Where:

p_i = proportional abundance of hectares of each climate-land cover relationship type into Michoacan province.

We used Shannon-Wiener's index to test the hypothesis that García's Mexican climatic map comprised equal land cover diversity as the map obtained by the bioclimatic approach. For that purpose, Hutcheson's algorithm (1970) was followed as (Equation 7):

$$\text{Eq. 7. } H_p = \frac{(N \log N) - (\sum f_i \log f_i)}{N}$$

Where:

f_i = frequency (hectares) registered for *climate-land cover relationship type i*.

The variance weighted diversity index was calculated according to the next equation (8):

$$\text{Eq. 8. } \mathbf{var} = \frac{[\sum fi \log^2 fi - (\sum fi \log fi)^2] / N}{N^2}$$

The difference between variances from both approaches was computed as (Equation 9):

$$\text{Eq. 9. } \mathbf{D}_{var} = \sqrt{Var_{García} + Var_{Bioclimates}}$$

Subsequently, the t value was obtained and compared to the t value in tables to assess the probability to accept or reject the hypothesis.

3. Results

3.1. Bioclimatic mapping

In total, following the bioclimatic approach, one macrobioclimate, three bioclimates, four thermotypes, five ombrotypes and 14 isobioclimates were distinguished in Michoacán. The macrobioclimate is Tropical. At the bioclimate level, the Tropical pluvisesonal predominates, covering 56.17% of the province; whereas the Tropical xeric covers 43.82% and the Tropical pluvial is negligible, covering only 0.01% of the entire province (Table 1).

Table 1. Isobioclimates cartographically depicted in the Province of Michoacán, Mexico as shown in figure 1. The combination of macrobioclimate (that is Tropical for all province of Michoacán, Mexico), bioclimate, thermo and ombro types is expressed in isobioclimates (cells), which in turn describe temperature and humidity gradients. Data outside the parenthesis correspond to percentage of the entire province covered by each isobioclimate. Data in the parenthesis represent the actual area (in hectares) of each isobioclimate.

Bioclimates	Thermotypes	Ombrotypes				
		Hyper-humid	Humid	Subhumid	Dry	Semiarid
Pluvial	Supratropical	0.004 (215)	0.006 (351)	...	...	...
	Infratropical	...	0.05 (2,918)	1.81 (106,197)	...	...
Pluviseasonal	Thermotropical	...	0.92 (54,188)	19.68 (1,153,109)	...	...
	Mesotropical	...	11.00 (644,727)	21.25 (1,244,855)	...	...
	Supratropical	0.04 (2,493)	1.40 (82,314)	...	...	...
Xeric	Infratropical	...	...	...	24.31 (1,424,337)	2.69 (156,976)
	Thermotropical	...	...	...	13.47 (789,485)	...
	Mesotropical	...	...	...	3.37 (197,735)	...

Note: The ellipses used in cells indicate no relationship.

The 14 isobioclimates depict the climatic diversity occurring in Michoacan as a result of humidity and temperature gradients obtained from thermotypes and ombrotypes (Fig. 1). As expected, isobioclimates were not evenly distributed; rather, their chorological pattern is heterogeneous and complex. The Tropical pluviseasonal mesotropical subhumid and Tropical pluviseasonal thermotropical subhumid predominate, covering nearly of 41% of the entire province. Their climatic expression is remarkable, for its contrasts to the Tropical xeric infratropical dry and Tropical xeric thermotropical dry, which cover nearly of 38% of the surface of the province.

The Tropical pluviseasonal mesotropical humid bioclimate, covering almost 11% of the province, is reflected in intermingling Nearctic and Neotropical taxa. To exemplify this further, two major

native ecosystems occurred within this isobioclimate: mountain cloud forest and tropical perennial forest (locally called Bosque Mesófilo and Bosque Tropical Perennifolio *sensu* Rzedowski (2006)).

Figure 1 depicts those isobioclimates that play an important role in the transitional conditions between the Nearctic and Neotropical biogeographical realms. The Tropical pluviseasonal thermotropical subhumid and the Tropical xeric thermotropical dry are considered ecotones. By comparison, the Tropical pluviseasonal thermotropical humid and Tropical xeric infratropical dry isobioclimates best represent the Nearctic and Neotropical realms, respectively.

The rest of the isobioclimates cover small, isolated portions of the province. Yet these are representative of unique climatic conditions such as the Tropical pluvial supratropical hyper-humid zone, the Tropical pluvial supratropical humid zone, the Tropical pluviseasonal supratropical hyper-humid and the Tropical pluviseasonal supratropical humid zones. These four contain elements that may be regarded as relicts of the last glaciations, with Cupressaceae and Coniferaceae as the predominant tree families (Rzedowski, 1991; J. Villaseñor & Ibarra-Manríquez, 1998; L. Villaseñor & Benítez, 2005; Villaseñor, 2004). In turn, the Tropical xeric infratropical semiarid, representing the most extreme tropical dry conditions, is dominated by the Cactaceae, Bursaraceae and Leguminoseae families. These small, isolated isobioclimates are particularly relevant for containing outstanding numbers of endemic species (Rzedowski, 1991, 2006; J. Villaseñor & Ibarra-Manríquez, 1998; L. Villaseñor & Benítez, 2005; Villaseñor, 2004).

As result of the map accuracy assessment carried out via confusion matrix, the estimated percentage obtained was of 87.7, which was regarded as satisfactory for the scale and complexity of conditions prevailing in the study area.

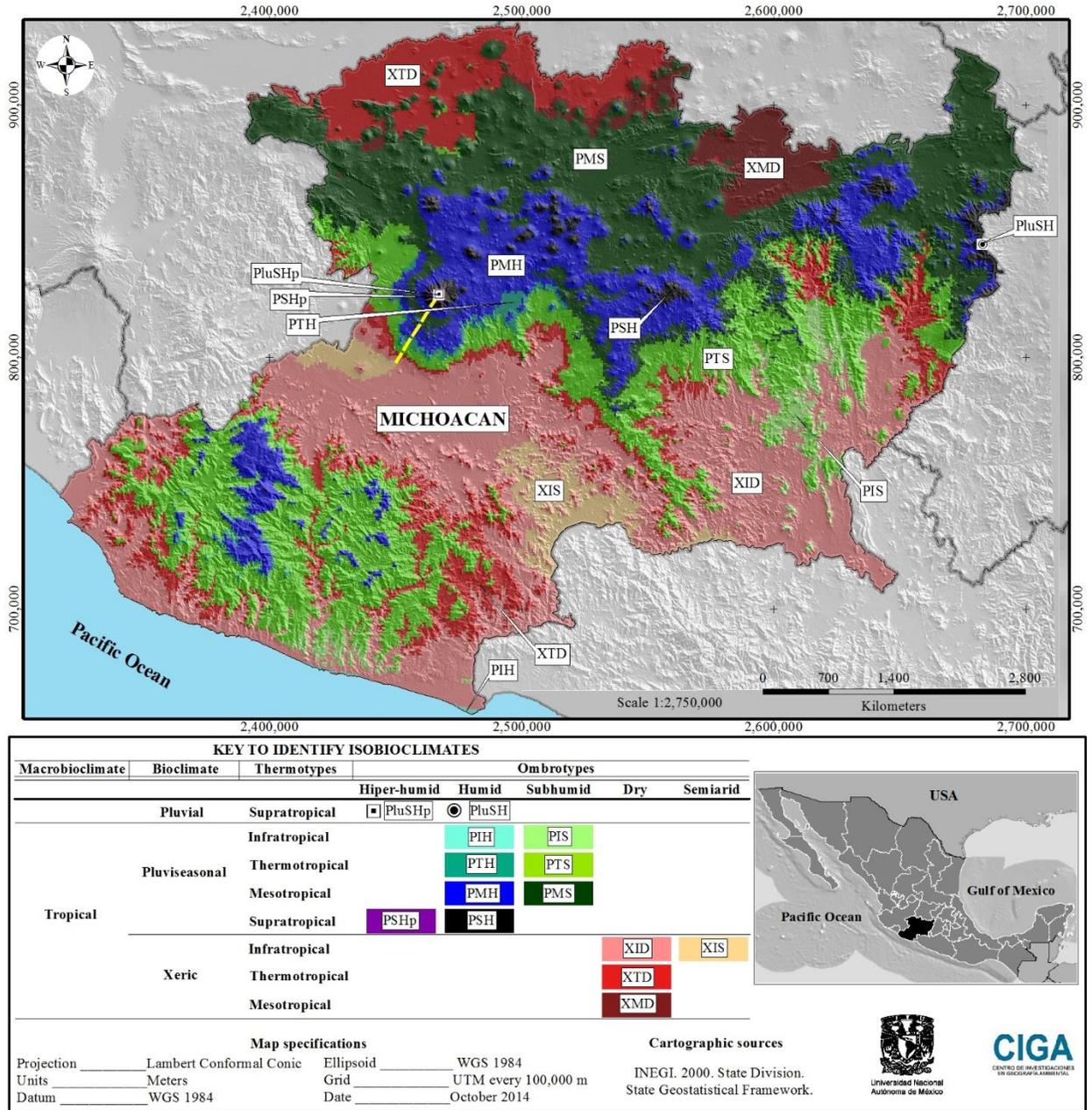


Figure 1. Bioclimatic diversity as surrogate of the geo-ecological complexity harbored in the province of Michoacan, Mexico. The yellow dashed line on the map indicates a transect of circa 32 km from Tancítaro summit to Apatzingán. Within this transect, 10 isobioclimates occur. The original map at scale 1:250,000 for visualization and printing purposes can be seen and downloaded at: www.ciga.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=66:articulo-1&catid=13:investigacion&Itemid=265

3.2. Bioclimatic-land cover and other classification relationships

Land cover analysis showed that tropical deciduous and temperate forests prevail significantly covering about the same proportion (47.94 and 47.29 per cent respectively). Tropical perennial forest follows in coverage with significantly less proportion covered (4.31 per cent). Grassland, hydrophyllous vegetation and scrubland are less relevant in coverage (0.23, 0.14 and 0.09 per cent respectively). Actual figures of relationships found between bioclimates versus land cover and climatic zoning sensu García (2004) are at: table 2 in www.ciga.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=66:articulo-1&catid=13:investigacion&Itemid=265

These six land cover types distribute differently among isobioclimates and climates (sensu García 2004). To exemplify this further, Tropical pluviseasonal thermotropical subhumid (PTS) and warm subhumid (Aw1) harbored most of the proportion of land cover types, namely: namely temperate, tropical deciduous and tropical perennial forests. Proportions among climatic classes contrasted significantly, so that tropical deciduous forest prevails in PTS (18.23%), whereas temperate forest in Aw1 (13.68%). The whole contrast among land cover types found in climatic classes from both climatic approaches is illustrated in figure 2. Shannon's diversity index described best the dissimilarities of land cover types found among climatic classes; so that bioclimates ($H' = 1.03$) are significantly less diverse ($t = 305.53$; $P < 0.05$) than climates ($H' = 1.13$; sensu García). Based upon Shannon evenness index, bioclimates also proved to be less homogeneous ($H_p = 0.65$) than climates classes ($H_p = 0.73$; sensu García).

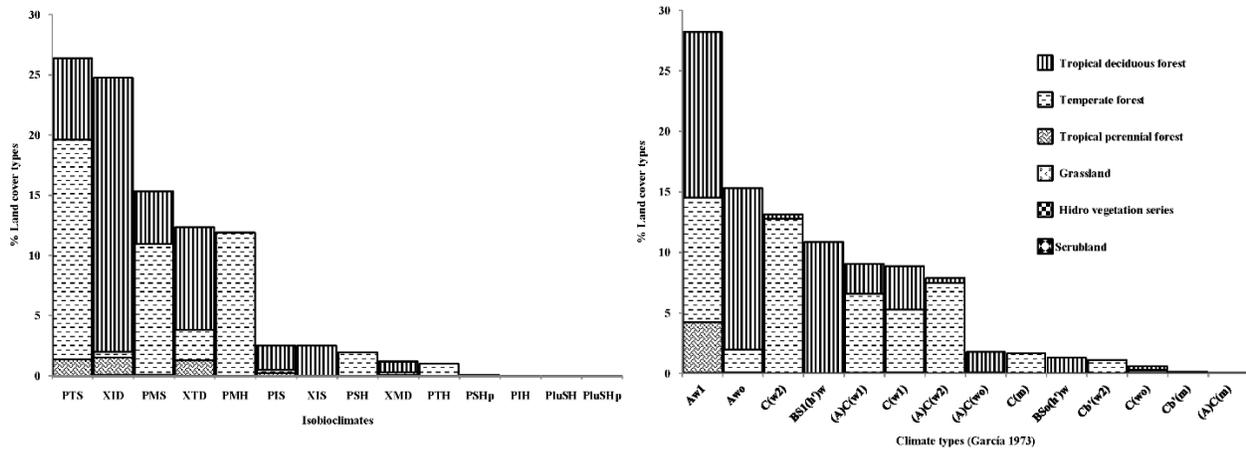


Figure 2. Percentages of land cover types present in two climatic types (Isobioclimates and Climate types (García2004)). The abbreviations of isobioclimates are as in Fig. 1. The meaning of abbreviations of Climate types (García 1973) can be seen in table 3 at: www.ciga.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=66:articulo-1&catid=13:investigacion&Itemid=265

4. Discussion

Sound climatic zoning of complex geo-ecological regions, such as Michoacán province, is challenging. In this regard, the bioclimatic approach (*sensu* Rivas-Martínez, Rivas, et al., 2011) has proved to be a useful tool in two ways. On the one hand, the approach has helped to express climatic patterns along gradients; on the other, it substantially facilitates the chorological expression of these climatic patterns. Description of climatic patterns along gradients has been done elsewhere in Mexico (Giménez & González, 2011) as well as in other temperate and tropical biogeographical realms (Costa et al., 2007; Cress et al., 2009; Navarro, 1997). As opposed to other climatic classification schemes widely used in Mexico, such as the Köppen classification modified by Enriqueta García (García, 2004), or other ones used in Central America (Holdridge, 1967), the bioclimatic approach computes its index threshold based on stressful periods where the native vegetation is directly affected. Consequently, native vegetation is regarded as the response variable of the mesoclimatic patterns distributed along gradients. Taking into account that two major mountain ranges cross Michoacán (namely: the Transversal Neovolcanic Belt (a recent Quaternary formation running from east to west, at elevations from 300 to 3800 meters above sea level), and the Southern Sierra Madre (a Tertiary formation running from south to east, at elevations from sea

level to 3000)), climates could be expected to follow clear, uniform altitudinal gradients. Yet this is not in fact the case since land forms in these mountain ranges are substantially accidental, with complex valleys, extended piedmonts, and large plateaus (Bocco et al., 2001). In addition, precipitation and evapotranspiration are also largely influenced by the windward slope effect, since rain comes from the Pacific, and the Southern Sierra Madre serves as a barrier. This is clearly reflected in the extreme dry and hot conditions that prevail in between these two ranges, so much so that this region is locally known as “Tierra Caliente” (the hot land). In other words, the anticipated climatic zoning, significantly influenced as it is by mountain ranges, turns out to follow a rather whimsical pattern that had not been cartographically portrayed by previous climatic approaches. At the micro-scale level (1:50,000), other meteorological data such as evapotranspiration may become relevant to refine climatic zoning (Rietkerk et al., 2011). At the meso-scale, however, these data do not play a major role in climatic patterns.

The transition between isobioclimates is based on humidity and temperature thresholds that occur during specific stressful situations. In turn, isobioclimates are considered climatic diversity indicators for such regions as Michoacán; where species diversity and endemism are exceptionally high, isobioclimates may be considered as a surrogate that describes ecological complexity. The last assertion is supported by the evenness index value calculated, showing that there was a better relationship between isobioclimates and specific land cover types that showed for other climatic classifications. It is worth mentioning that contrasting ecological transitions—depicted by the number of isobioclimates—occur in many areas within Michoacán. To illustrate this further, a transect of approximately 32 km from Tancítaro summit to Apatzingán plain was delineated, as is indicated by a yellow dashed line on the map. Within this transect, 10 isobioclimates occur, representing perhaps the shortest, most contrasting ecological mosaic in Mexico.

This paper aimed at assessing the ability of the bioclimatic approach to depict the complexity of the province of Michoacán. We also applied this research to bioclimatic outputs to create a rigorous cartographic methodology to express climatic diversity at the meso-scale. Both objectives were successfully accomplished. A number of drawbacks to the traditional bioclimatic approach

were identified during this research. For instance, data from meteorological stations are insufficient to pursue a sound cartographic representation of Isobioclimates. To overcome this limitation, geo-statistical methods are necessary when translating point data into polygon data.

It is well-worth mentioning that Macrobioclimates, Bioclimates, Thermotypes and Ombrotypes may each have a cartographic representation. In this paper, nonetheless, our focus was on the isobioclimates, because they are a clear surrogate of geo-ecological complexity.

The cartographic expression of climatic patterns has been, is and will continue to represent a challenge for various reasons (Van-Lynden & Mantel, 2001). Climate data obtained at specific points (i.e. traditional meteorological stations) needs to be interpolated into polygons in order to be properly mapped. In order to do so with statistical rigor, a number of assumptions must be fulfilled. For example, meteorological stations must represent the surrounding homogeneous conditions, the distance between them should be sufficient to constitute a network, and the number of stations must be a function of the heterogeneity of the area (Cress et al., 2009). Current data management tools and analytical methods have, in part, helped to overcome these limitations. RS, GIS and geostatistics have enabled access to, and the analysis of, data in a raster format (Fernández-Eguiarte et al., 2012; Shepard, 1968).

The relevance of the map presented in figure 1 is fourfold. First, it is a baseline database for modeling former potential distribution patterns of forested land cover types. Second, it serves as a reference to depict present land-use cover change analyses. Third, the map is a source of data for analyzing possible relationships among isobioclimates and specific land uses, which may need to either expand or shrink in order to fulfill production demands. Finally, the map presented in figure 1 may be regarded as a baseline to predict effects of climatic changes.

Michoacán province exports the largest number of avocado, lemon, mango and other fruits to North America, and depends heavily on permanent tree fruit production. A delicate balance must

be achieved between production to meet these export demands and the maintenance of native ecosystem functions, which provide the services for most productive activities. Cultural/natural tradeoffs must be made in order to sustainably satisfy socio-economic and conservation needs (Velázquez et al., 2009). The results presented in this paper may serve as input to help reorient policy makers and other stakeholders involved in this endeavor.

5. Literature cited

- Antaramián-Harutunian, A., & Correa-Pérez, G. (2003). Fisiografía. In G. Correa-Pérez (Ed.), *Atlas geográfico de Michoacán* (pp. 42–46). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Educación de Michoacán, El Colegio de Michoacán.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39(3-4), 211 – 219. <http://doi.org/10.1016/0169-555X>
- Cabrera, A., González, J., & Ayala, J. (2005). Los suelos. In L. Villaseñor (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 29–31). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Card, D. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431–439.
- Carranza, E. (2005). Vegetación. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 38–46). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México*. México, D.F.: CONABIO.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental*. (3rd ed.). Barcelona: Ariel. Retrieved from <http://www.slideshare.net/jaiflo7503/teledeteccion-ambiental-listo>

CONABIO. (2008). Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

Costa, M., Cegarra, A., Lugo, L., Lozada, J., Guevara, J., & Soriano, P. (2007). The bioclimatic belts of the Venezuelan Andes in the State of Mérida. *Phytocoenologia*, 37(3), 711–738. <http://doi.org/10.1127/0340-269X/2007/0037-0711>

Cress, J., Sayre, R., Comer, P., & Warner, H. (2009). Terrestrial Ecosystems—Isobioclimates of the conterminous United States. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3084*, 1. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/sim/3084>

Cué-Bär, E., Villaseñor, J. L., Arredondo, L., Cornejo, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (78), 47–81. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57707806>

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

del Río, S., & Penas, A. (2006). Potential areas of evergreen forests in Castile and Leon (Spain) according to future climate change. *Phytocoenologia*, 36(1), 45–66. <http://doi.org/10.1127/0340-269X/2006/0036-0045>

Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science*, 289(5487), 2068–2074. <http://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>

- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Lobato, R. (2012). Atlas Climático Digital de México (versión 2.0). Retrieved from <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>
- Foody, G. (2008). GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 32(2), 223–235. <http://doi.org/10.1177/0309133308094656>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5th ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- Giménez, J., & González, O. (2011). Pisos de vegetación de la Sierra de Catorce y territorios circundantes (San Luis Potosí). *Acta Botánica Mexicana*, (94), 91–123. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57415694004>
- Giménez, J., & Ramírez, I. (2004). Análisis fitosociológico de los bosques de oyamel [*Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. & Schlecht.] de la Sierra de Angangueo, Región Central de México. *Fitosociologia*, 41(1), 91–100. Retrieved from <http://www.scienzadellavegetazione.it/sisv/documenti/Articolo/pdf/148.pdf>
- Gonzalo, J. (2010). *Diagnosis fitoclimática de la España peninsular* (1st ed.). España: Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <http://doi.org/10.1002/joc.1276>

Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. Retrieved from <http://cct.or.cr/publicaciones/Life-Zone-Ecology.pdf>

Hutcheson, K. (1970). A test for comparing diversities based on the Shannon formula. *Journal of Theoretical Biology*, 29(1), 151–154.

INEGI. (2010). *Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000 serie IV (continuo nacional)*. Aguascalientes, México.

INEGI. (2011). *Panorama sociodemográfico de Michoacán de Ocampo*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC. (2013). Resumen para responsables de políticas. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. (p. 222). Cambridge, Reino Unido; Nueva York, NY: Cambridge University Press. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

Israde, I. (2005). Los cuerpos de agua. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 32–37). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Macías, M. (2009). *Estudio de las relaciones entre zonobiotomas, bioclimas y vegetación en la costa del pacífico norteamericano*. Universidad de Alcalá.

Magurran, A. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. New Jersey, USA.: Princenton University Press, Princenton.

Navarro, G. (1997). Contribución a la clasificación ecológica y florística de los bosques de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología Y Conservación Ambiental*, (2), 3 – 37. Retrieved from http://www.cedsip.org/PDFs/2_1navarro.pdf

Nogués-Bravo, D., & Rahbek, C. (2011). Ecology. Communities under climate change. *Science (New York, N.Y.)*, 334(6059), 1070–1071. <http://doi.org/10.1126/science.1214833>

Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., & Rodríguez, J. (2010). Bioclimate-Vegetation Interrelations in Northwestern Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 55(3), 311–322. <http://doi.org/10.1894/DW-121.1>

Peinado, M., Macías, M., Ocaña-Peinado, F., Aguirre, J., & Delgadillo, J. (2010). Bioclimates and vegetation along the Pacific basin of Northwestern Mexico. *Plant Ecology*, 212(2), 263–281. <http://doi.org/10.1007/s11258-010-9820-z>

Peinado, M., Monje, L., & Martínez, J. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla - La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto centenario. Retrieved from http://foto.difo.uah.es/geobotanica/acta_botanica_mexicana.html

Pennisi, E. (2012). Computational biology. Virtual hot spots. *Science (New York, N.Y.)*, 336(6078), 172–4. <http://doi.org/10.1126/science.336.6078.172>

Ramamoorthy, T. P., Bye, R., Lot, A., & Fa, J. (1998). *Diversidad biológica de México*. (T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, & J. Fa, Eds.). México, D.F.: Instituto de Biología,

Universidad Nacional Autónoma de México.

Rietkerk, M., Brovkin, V., van Bodegom, P. M., Claussen, M., Dekker, S. C., Dijkstra, H. A., ... Seneviratne, S. I. (2011). Local ecosystem feedbacks and critical transitions in the climate. *Ecological Complexity*, 8(3), 223–228. <http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.03.001>

Rivas-Martínez, S. (2005). *Avances en geobotánica*. España. Retrieved from <http://www.ranf.com/pdf/discursos/ina/2005.pdf>

Rivas-Martínez, S., Navarro, G., Penas, A., & Costa, M. (2011). Biogeographic Map of South America. An initial advance. *International Journal of Geobotanical Research*, 1(1), 21–40. <http://doi.org/10.5616/ijgr110002>

Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg110001>

Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica de Mexicana*, (14), 3–21. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57401402>

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., ... Maza, J. de la. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Capital Natural de Mexico_Sintesis.pdf

- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference on -* (pp. 517–524). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Skutsch, M., Simon, C., Velazquez, A., & Fernández, J. C. (2013). Rights to carbon and payments for services rendered under REDD+: Options for the case of Mexico. *Global Environmental Change*, 23(4), 813–825. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.02.015>
- Thornthwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <http://doi.org/10.2307/210739>
- Van-Lynden, G. W. J., & Mantel, S. (2001). The role of GIS and remote sensing in land degradation assessment and conservation mapping: some user experiences and expectations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 61–68. <http://doi.org/10.1016/S0303-2434>
- Velázquez, A., Bocco, G., Romero, F. J., & Pérez Vega, A. (2003). A Landscape Perspective on Biodiversity Conservation. *Mountain Research and Development*, 23(3), 240–246. [http://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0240:ALPOBC\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0240:ALPOBC]2.0.CO;2)
- Velázquez, A., Cué-Bär, E., Larrazábal, A., Sosa, N., Villaseñor, J., McCall, M., & Ibarra-Manríquez, G. (2009). Building participatory landscape-based conservation alternatives: A case study of Michoacán, Mexico. *Applied Geography*, 29(4), 513–526. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.11.001>
- Velázquez, A., Mas, J., Bocco, G., & Palacio-Prieto, J. (2010). Mapping land cover changes in Mexico, 1976-2000 and applications for guiding environmental management policy.

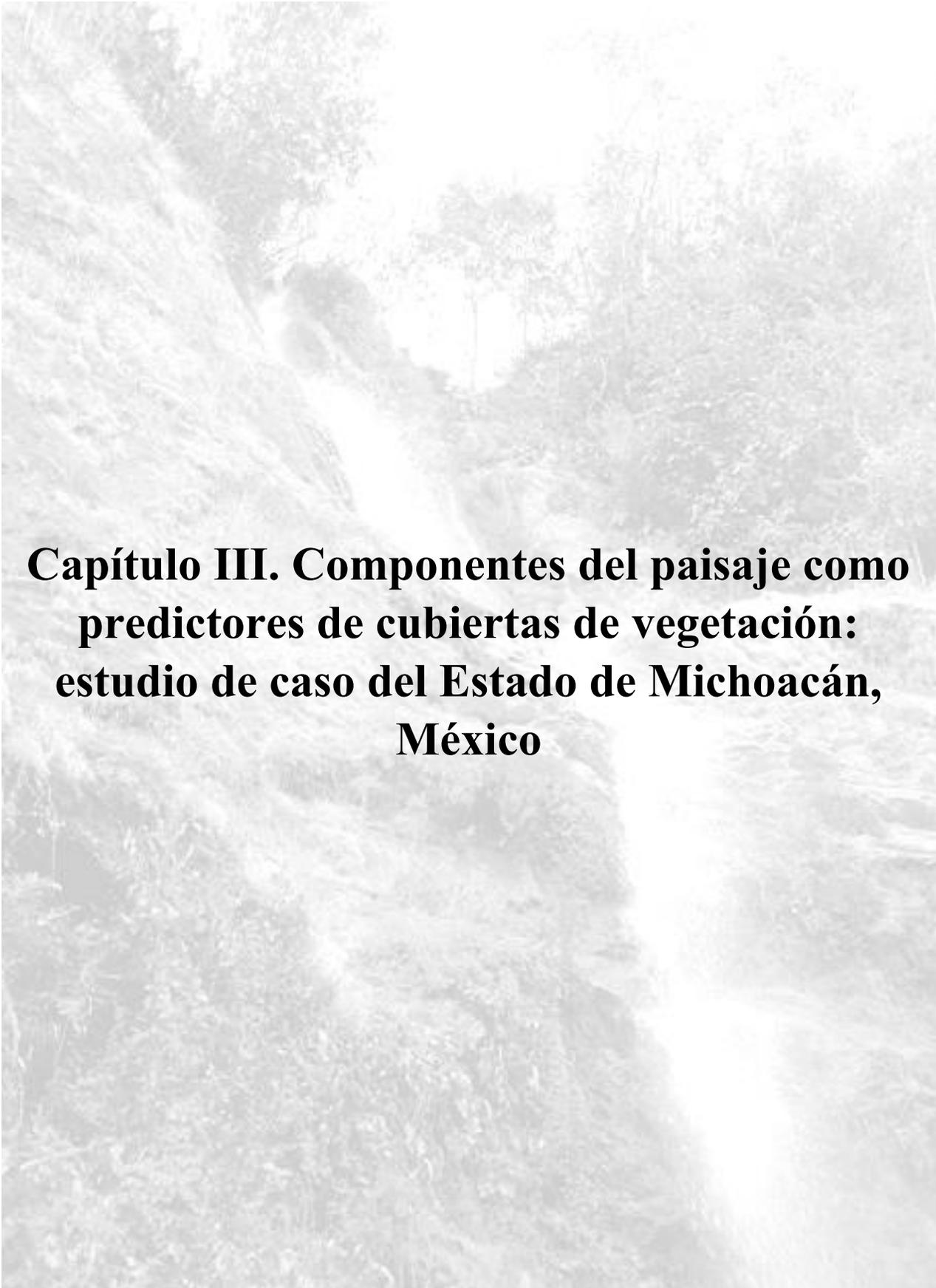
Singapore Journal of Tropical Geography, 31(2), 152–162. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9493.2010.00398.x>

Villaseñor. (2004). Los géneros de plantas vasculares de la flora de México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 75, 105–135. Retrieved from <http://www.ecologia.unam.mx/laboratorios/evolucionmolecular/images/file/ClaseProcariontes/LauraEspinoza/GenerosDePlantEnMex.pdf>

Villaseñor, J., & Ibarra-Manríquez, G. (1998). La riqueza arbórea de México. *Boletín Del Instituto de Botánica de La Universidad de Guadalajara*, 3(5), 95–105.

Villaseñor, L., & Benítez, H. (2005). Introducción. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 15–20). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Whittaker, R. (1967). GRADIENT ANALYSIS OF VEGETATION. *Biological Reviews*, 42(2), 207–264. <http://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1967.tb01419.x>



Capítulo III. Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del Estado de Michoacán, México

Resumen

El Estado de Michoacán alberga una yuxtaposición de riquezas culturales y naturales destacable que se entrelazan entre condiciones geológicas, geográficas y ecológicas. Este patrimonio natural y cultural está hoy día amenazado, por ende los tomadores de decisiones buscan información de línea base para restaurar y reorientar las acciones de desarrollo. El objetivo de este artículo, por ende, fue predecir, los patrones de cubierta vegetal oriunda, a través de un método replicable. La predicción se basó en atributos climáticos, geológicos, geomorfológicos y ecológicos, jerárquicamente yuxtapuestos a través de un sistema de información geográfica. Las reglas de decisión se basaron en lógica booleana dando énfasis a la zonificación bioclimatológica. La predicción de la cubierta vegetal oriunda mostró que los bosques estacionales tropicales cubren la mayor superficie, mientras que la vegetación acuática cubre menos representada. Para concluir, los atributos que delimitan el paisaje, jerárquicamente organizados, probaron ser un método robusto y replicable para reconstruir los patrones de la cubierta vegetal oriunda, actualmente en áreas de cobertura antropogénica. Este resultado expresado en un mapa, servirá como línea base para predecir los escenarios futuros a la luz de los cambios climáticos previstos.

1. Introducción

De acuerdo a Larcher (2003), el clima es el principal factor regulador de la estructura, función y distribución de la cubierta de vegetación. Walter (1985), entre otros, afirma que el clima a lo largo del tiempo opera por encima de factores físicos y bióticos. De manera general, el clima está integrado por elementos meteorológicos (como la temperatura, humedad, precipitación, viento, radiación solar, luz, presión atmosférica, entre otros) que se encuentran parcial o estrechamente relacionados, que pueden llegar a interactuar de manera constante y que en su conjunto son reconocidos como parte del llamado sistema climático (P. Kabat et al., 2004; McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). Estos elementos del clima manifiestan patrones de variación espacial y temporal, que en cierto grado pueden explicarse por las características geográficas o atmosféricas (del Río, 2005; Fernández-González, 2004; McGuffie & Henderson-Sellers, 2005; Peinado, Monje, & Martínez, 2008).

Las diversas propuestas climáticas en el mundo han sido desarrolladas intentado agrupar y sistematizar los elementos del clima en clases, con el fin de ordenar y explicar de manera sencilla y coherente los eventos que ocurren dentro de la atmósfera, hidrósfera, biósfera y geósfera (Claussen, 2004; McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). No obstante, y a pesar de que el clima es definido como “el conjunto de magnitudes promedio analizados por medio de valores estadísticos que caracterizan la estructura y comportamiento de la atmósfera, hidrósfera, biósfera y geósfera a lo largo de un periodo de tiempo” (Aguirre de Cárcer & Carral, 2009), es común que las diferentes propuestas climáticas tomen a la vegetación como base para desarrollar sus sistemas clasificatorios (del Río, 2005; P. Kabat et al., 2004; Peinado et al., 2008; Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011). La biología de las plantas, su distribución mundial y la constancia de su permanencia sobre la superficie terrestre, han hecho que sean un buen parámetro para poder identificar, indirectamente, climas (Claussen, 2004; del Río, 2005; P. Kabat et al., 2004; McGuffie & Henderson-Sellers, 2005; Peinado et al., 2008; Rivas-Martínez et al., 2011). Ejemplos de esto último se ve reflejado en las propuestas climáticas propuestas por Thornthwaite (1948) usada principalmente en Norteamérica, en la de Holdridge (1967) con mayor presencia en Centroamérica y Sudamérica, en la de Köppen modificada por García (2004) en México y la de Rivas-Martínez et al., (2011) aplicada primordialmente en España. Las tres primeras tomaron a la vegetación como parte integral de sus trabajos, en tanto la última se basó únicamente en parámetros atmosféricos. Así, las investigaciones en las que se hace hincapié a la estrecha relación clima-vegetación no se habla propiamente de estudios de climatología, sino más bien de “bioclimatología” (del Río, 2005; Fernández-González, 2004; Peinado et al., 2008; Rivas-Martínez et al., 2011).

El enfoque propuesto por Rivas-Martínez et al., (2011) (llamado en adelante como Bioclimatología), se centra en la comprensión y representación de la relación clima-vegetación visto, principalmente, a escala regional. Esta propuesta está organizada en tres niveles: cinco macrobioclimas a nivel mundial (polar, boreal, templado, mediterráneo y tropicales), 28 bioclimas y un extenso número de combinaciones de unidades bioclimáticas (termotipos [parámetro de temperatura] y ombrotipos [parámetro de precipitación]). La combinación de un macrobioclima, un bioclima y de una unidad bioclimática (un termotipo y un ombrotipo) representa una unidad bioclimática llamada isobioclima. La Bioclimatología se basa primordialmente en datos climáticos de precipitación y temperatura de los meses más extremos del año (secos, húmedos, cálidos o

fríos). Los datos son procesados y transformados en índices para proveer de un sistema de clasificación, representando patrones a lo largo de gradientes (Rivas-Martínez et al., 2011).

El estudio de la vegetación comprendido como el agregado de especies de plantas de un lugar y tiempo específico, única para cada área o región del planeta, producto de una historia evolutiva (Odum, 2006), ha tenido diversos objetivos, entre los que se encuentran:

- Descripción y definición de los diferentes tipos de vegetación y la flora que la integra (Kent & Coker, 2012; Miranda & Hernández-X., 1963; Rzedowski, 2004, 2006).
- Distribución de la vegetación, su cobertura (amplitud o porcentaje que abarca la vegetación sobre el terreno) y su relación con su entorno (Kent & Coker, 2012; Steffen, Cramer, Matthias, & Bugmann, 1996; van der Maarel, 2005; Walter, 1994).
- Caracterización de la vegetación como hábitat de animales, aves e insectos (Giffard, Jactel, Corcket, & Barbaro, 2012; Kent & Coker, 2012; Magle & Crooks, 2008; Sulaiman, Mohamad, & Idilfitri, 2013).
- Mapeo e identificación indirecta de tipos de cubiertas de vegetación a través de la observación remota de la superficie terrestre (cubiertas de vegetación) (Chuvieco, 2008; Driese, Reiners, Merrill, & Gerow, 1997; Hearn et al., 2011; Kent & Coker, 2012; Pedrotti, 2013).

La información resultante de estos estudios se han visto reflejados en investigaciones de conservación y manejo de recursos naturales, en informes de impacto ambiental y de orientador en el monitoreo de actividades económicas del sector primario y secundario. Asimismo, la identificación de tipos de cubiertas de vegetación son componentes esenciales en los análisis de

tipos y procesos de cambio en determinados lapsos del tiempo, además de ser clave en la caracterización y elucidación de patrones climático, entre otros más (Adams, 2010; Box, 1996; Braun-Blanquet, 1979; Kent & Coker, 2012; A. Velázquez et al., 2002; A. Velázquez, Sosa, Navarrete, & Torres, 2005; Alejandro Velázquez, Mas, Bocco, & Palacio-Prieto, 2010). El avance de la tecnología en las últimas décadas ha permitido digitalizar los tipos de cubiertas de vegetación y sus modificaciones causadas por diversos factores. La Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido las herramientas que han permitido obtener datos que detallan la posición (coordenadas geográficas) y los atributos (información alfanumérica) de los eventos que suceden en la superficie terrestre (Chuvieco, 2008; Foody, 2008; Pedrotti, 2013).

En México han existido diversos esfuerzos para conocer, clasificar, identificar y, eventualmente cartografiar, la vegetación o los tipos de cubiertas de vegetación que están presentes a lo largo del territorio nacional. Ejemplos de investigaciones en vegetación son los formulados por Miranda y Hernández-X (1963) y Rzedowski (2006); en tanto que los estudios elaborados por el Instituto de Geografía de la UNAM (Palacio-Prieto et al., 2000) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) expresan información de tipos de cubiertas de vegetación (Velázquez et al., 2002; Victoria-Hernández, Niño-Alcocer, Rodríguez-Avalos, & Argumedo-Espinoza, 2011). El INEGI, a lo largo de su historia, ha realizado cinco series de conjuntos de datos vectoriales de uso de suelo y cubiertas de vegetación a escala 1:250,000. La información geográfica que cubre todo el país fue recopilada a través de herramientas de PR y analizadas, primordialmente, en SIG. La leyenda de sus mapas fue realizada tomando como base clasificaciones de vegetación de diversos autores y utilizadas acorde a los objetivos que se persiguieron en cada serie (Velázquez et al., 2002; Victoria-Hernández, Niño-Alcocer, Rodríguez-Avalos, & Argumedo-Espinoza, 2011).

En las últimas décadas, alrededor del mundo, se han incrementado las publicaciones de corte climático, sus alteraciones y la influencia sobre el medio ambiente. No obstante, y de acuerdo a lo mencionado con anterioridad, muchos de estos trabajos hacen difícil evaluar las afectaciones sobre la vegetación dado que usan a la misma como parte de sus modelos. Así, el objetivo del presente trabajo es predecir patrones de cubiertas de vegetación con base en parámetros bioclimáticos y complementado con información de elementos geomorfológicos y geológicos. En ejercicio

científico se limitó al Estado de Michoacán por ser considerado un ejemplo de alta complejidad geocológica y que en su conjunto cubre una superficie ligeramente mayor que Costa Rica. Los resultados se discuten a la luz de su relevancia para estudios de línea base para estudios de cambio climático y manejo de recursos naturales.

2. Zona de estudio

El Estado de Michoacán de Ocampo se encuentra ubicado al Oeste de la República Mexicana, cuenta con una extensión superficial de 58,599 km² y representa el 3% de la superficie total del país (INEGI, 2011) (Figura 1).

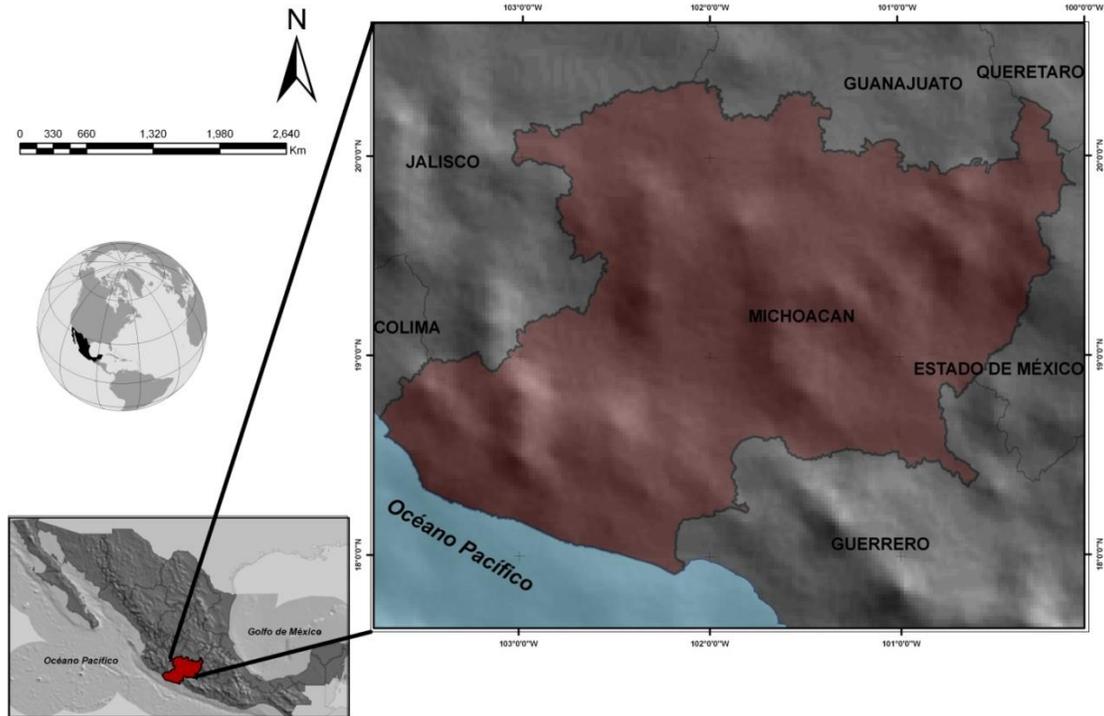


Figura 1. Localización del estado de Michoacán, México.

La intersección de las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical, además de la compleja topografía marcada primordialmente por regiones montañosas como la Sierra Madre del Sur y el Eje Volcánico Transversal, dan como resultado que Michoacán sea uno de los primeros cinco

estados con mayor diversidad biológica de México (Velázquez et al., 2005; Villaseñor & Benítez, 2005).

La orografía del estado está predominada por las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. Estas últimas cuentan con una gran ramificación que hace a la zona una de las más montañosas de México (A. Antaramián-Harutunian & Correa-Pérez, 2003; CNA, 2009). La primera abarca 26,956 km², es decir, el 46% del territorio michoacano, en tanto que la segunda tiene una extensión territorial de 31,643 km², comprendiendo el 54% del estado en cuestión.

El estado cuenta con 14 de las 18 unidades de suelos reportadas para México (Cabrera, González, & Ayala, 2005). El Leptosol, Regosol, Luvisol, Acrisol, Andosol, Vertisol y Fozem son los suelos más importantes en el estado, abarcando el 94%, aproximadamente, del territorio michoacano (Cabrera et al., 2005).

El estado de Michoacán forma parte de dos de las cuencas hidrológicas más importantes para el país, la de los ríos Lerma y Balsas. En la provincia fisiográfica Eje Volcánico Transversal, que corresponde a la región centro - norte de dicha entidad federativa, se localizan los ríos Tlalpujahuá, Cachiví y Duero, afluentes principales de la primera cuenca mencionada anteriormente. En tanto que para la segunda cuenca, ubicada en la región Sierra Madre del Sur, los principales tributarios michoacanos que proveen a dicho caudal son los ríos Cutzamala, Carácuaro y Tepalcatepec (CNA, 2009; INAFED, 2010; Israde, 2005; Mendoza, Velázquez, Larrazábal, & Toledo, 2010). Las vertientes que se desprenden hacia el Océano Pacífico se cuentan en más de 50, siendo las de mayor jerarquía la de los ríos Coahuayana, Aquila, Ostula, Motín del Oro, Coire, Cachán y Nexpa (INAFED, 2010).

La gran variación altitudinal presente en el estado, desde el nivel del mar (0 m) hasta los 3,857 m de altitud del Pico de Tancítaro, promueve la diversidad de climas (INAFED, 2010; L. Villaseñor,

2005). De acuerdo a la clasificación realizada por Köppen y modificada por García (2004) en la región están presentes los climas Aw (tropical lluvioso, con lluvias predominantes en verano) en el suroeste, BS (seco estepario) en la depresión del río Tepalcatepec, Cw (templado con lluvias en verano) en el norte y Cf (templado con lluvias todo el año) en las partes más altas del Eje Volcánico transversal (Antaramián-Harutunian, 2005).

La vegetación del estado está integrada por una gran variedad de plantas, enlistándose 17 tipos diferentes de comunidades de vegetación de 28 que se encuentran descritas para México (Carranza, 2005; Rzedowski, 2004, 2006). Entre ellas se encuentran los bosques de coníferas, bosques de encino, bosques mesófilos de montaña, selva baja caducifolia, matorral subtropical, bosque espinoso, selva baja subcaducifolia y vegetación acuática y subacuática (Carranza, 2005; Rzedowski, 2004, 2006). Michoacán presenta aproximadamente el 50% de familias y géneros de árboles de México (Velázquez et al., 2009) y el 23% de especies arbóreas reportados para toda la República Mexicana (845 especies) (Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo, Cornejo, & Ibarra-Manríquez, 2006; Villaseñor & Ibarra-Manríquez, 1998)

3. Material y método

3.1. Elementos discretizadores del paisaje

Los elementos del paisaje seleccionados para llevar a cabo la presente investigación fueron los siguientes:

3.1.1. Tipos de cubiertas de vegetación

El conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 Serie V (CDVUSV-sV) elaborado por INEGI en el año 2013, fue la fuente de información más actualizada (hasta el momento) para la obtención de los tipos de cubiertas de vegetación presentes en el estado de Michoacán, México. Este mapa digital fue realizado utilizando técnicas de fotointerpretación de imágenes de satélite Landsat TM5 del año 2011 y complementado con información obtenida de trabajo de campo. El esquema de clasificación fue de acuerdo al Diccionario de Datos Vectoriales

de Uso del Suelo y Vegetación Serie IV para la escala 1:250,000 (INEGI, 2013). Esto último se desprende de la propuesta de los tipos de cubierta terrestre del Land Cover Classification System de FAO (2000) y del sistema de clasificación de vegetación y usos agrícolas (de uso del suelo) creado por INEGI (Victoria-Hernández et al., 2011). El sistema clasificatorio para el área de estudio estuvo conformado por categorías de comunidades de cubiertas de vegetación oriunda, las cuales fueron re-categorizadas a nivel de cubiertas de formación de vegetación, entendidas estas como “un grupo de comunidades vegetales de un área continental o de otra área geográfica que presentan características fisonómicas y ambientales similares” (SEMARNAP-UNAM, 2000). Al agrupar a nivel de cubiertas de formación de vegetación la certidumbre del estudio aumentó, dado que a nivel de categorías de cubiertas de comunidades de vegetación, propias del CDVUSV-sV, presenta errores. Las mayores inconsistencias que se detectaron fueron en la interpretación y delimitación de tipos de cubiertas de vegetación. Los polígonos a nivel de cubierta de formación de vegetación fueron ratificados con 268 puntos de verificaciones de campo, recabados a lo largo de todo el estado de Michoacán durante los últimos 5 años de trabajo.

Las categorías relacionadas con actividades preponderantemente antrópicas fueron categorizadas como "sin dato". La categoría "cuerpos de agua" fue respetada. El re-arreglo de categorías fue realizado en la base de datos del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación Serie V de INEGI (2013) en el programa ArcGIS 9.3.

3.1.2. Isobioclimas

Los insumos para definir los nichos climáticos derivan de la investigación realizada por Gopar-Merino et al., (2015). Dicho insumo está a escala 1:250,000 y está integrado por un macrobioclima, tres bioclimas, cuatro termotipos y cinco ombrotipos. La combinación de los tres niveles de organización resultan en un nicho climático llamado isobioclima y que de acuerdo a Gopar-Merino et al., (2015), ocurren 14 en el contexto de Michoacán (http://www.ciga.unam.mx/images/investigacion/Isobioclim_1902_2011_INGLES_4_8_WEB_ECOSPHERE.pdf).

3.1.3. Geomorfología

El mapa geomorfológico del estado de Michoacán fue tomado del trabajo realizado por Bocco et al., (2001) a una escala espacial de 1:250,000. Este mapa contiene la distribución geográfica de ocho geoformas predominantes en el relieve y fueron identificados bajo criterios morfogenéticos (amplitud del relieve y gradiente de pendientes, derivados de modelos digitales del terreno) y morfolitológicos (Bocco et al., 2001). Las clases incluidas son: Altiplanicies, Colinas, Lomeríos altos, Lomeríos bajos, Montañas, Piedemontes y Planicies.

3.1.4. Geología

El conjunto de datos vectoriales geológicos realizado por INEGI (1984) refleja 23 unidades de tipos de rocas que afloran en la región y estructuras geológicas originadas por eventos tectónicos (p. ej. volcanes, fallas y fracturas). El conjunto de rocas incluyen: aluviales, andesitas, areniscas, basalto, brecha sedimentaria, brecha volcánica, caliza, complejo metamórfico, conglomerados, dacitas, dioritas, gabros, granitos, granodioritas, lacustres, latitas, limolitas, litoral, lutita, meta, residual, riódacita, riolita, toba, tonalita, taquita y volcano clástico.

3.2. Expresión cartográfica: Tipos de cubiertas de vegetación actual y potencial

La expresión cartográfica de los tipos de cubiertas de vegetación actual reflejará el re-arreglo de las fronteras de los polígonos del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación de la Serie V de INEGI (2013) debido a la recategorización de las clases, las cuales fueron de nivel de cubierta de comunidad a cubierta de formación de vegetación (ver apartado 3.1.1). El diseño del mapa de los tipos de cubiertas de vegetación potencial partió del re-nombramiento de los espacios etiquetados como "sin dato" hacia alguna con categoría de cubierta de formación de vegetación. Lo anterior se logró, en primer lugar, realizando la intersección geométrica de los conjuntos de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación Serie V (INEGI, 2013) con las unidades isobioclimáticas (Gopar-Merino et al., 2015). Posteriormente se realizó la intersección con las unidades geomorfológicas (Bocco et al., 2001) y finalmente con las unidades geológicas (INEGI, 1984). El orden de las intersecciones fueron realizadas conforme al orden de importancia que

tienen los componentes del paisaje en el establecimiento de los tipos de cubiertas de vegetación en la zona de estudio. Así, lo anteriormente mencionado se ve reflejado en la siguiente fórmula de álgebra booleana o álgebra lógica (Barco, 2005):

Si $\{P_{XTCVA} : \text{un Isobioclimaa} \wedge \text{una Geomorf.a} \wedge \text{una Geol.a}\} \Rightarrow P_{YTCVP} = P_{XTCVA}$,
 $\Leftrightarrow \{P_{SDA} : \text{un Isobioclimaa} \wedge \text{una Geomorf.a} \wedge \text{una Geol.a} \notin P_{SDB} : \text{Isobioclimab} \wedge \text{una Geomorf.b} \wedge \text{una Geol.b}\}$

Donde:

P_{XTCVA} = Polígono "X" de tipo de cubierta de vegetación actual.

Geomorf. = Unidad geomorfológica.

Geol. = Unidad geológica.

P_{YTCVP} = Polígono "Y" de tipo de cubierta de vegetación potencial.

PSD = Polígono "sin dato" de tipo de cubierta de vegetación.

Todos los procedimientos anteriores fueron realizados mediante el uso del software ArcGIS 9.3. Los mapas de salida de tipos de cubiertas de vegetación actual y potencial fueron realizados a escala 1: 250,000.

4. Resultados

De acuerdo a lo reportado por INEGI para el año 2013, el 59.05% de la superficie del estado de Michoacán está conformada por algún tipo de cubierta de vegetación oriunda. La re-categorización de los tipos de cubiertas de vegetación, de comunidad a formación, arrojó que la selva baja caducifolia ocupa la mayor extensión territorial con 1,671,157 ha, seguida por la de bosque templado con 1,624,006 ha. La vegetación hidrófila y el matorral xerófilo fueron los tipos de cubierta con menor presencia con 12,970 y 4,644 ha respectivamente (Tabla 1, Figura 2).

Tabla 1. Tipos de cubiertas de vegetación actuales presentes en el estado de Michoacán, México.

Tipos de cubiertas de comunidades de vegetación a nivel de comunidad de acuerdo a INEGI (2013).	Tipos de cubiertas de vegetación a nivel de formación (Re-categorización)	Porcentaje de cubierta oriunda actual
Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia	28.52
Bosque de cedro		
Bosque de encino		
Bosque de encino-pino		
Bosque de oyamel	Bosque templado	27.71
Bosque de pino		
Bosque de pino-encino		
Bosque mesófilo de montaña		
Selva mediana subcaducifolia	Selva mediana subcaducifolia	2.52
Manglar		
Pastizal halófilo	Vegetación hidrófila	0.22
Tular		
Matorral crasicaule		
Mezquital xerófilo	Matorral xerófilo	0.08
Selva baja espinosa caducifolia		
Total		59.05

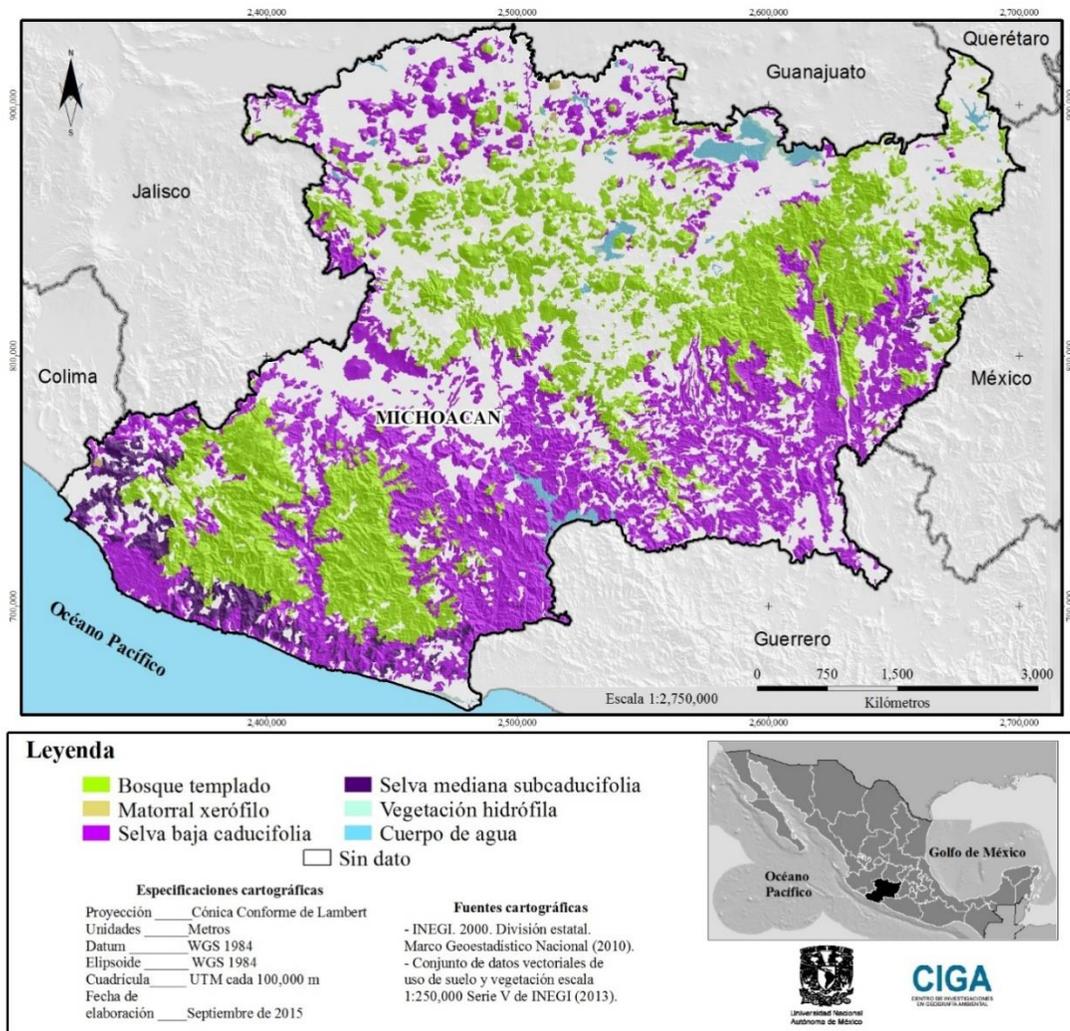


Figura 2. Cubiertas de vegetación actuales presentes en el estado de Michoacán, México. Los espacios en blanco (sin dato) representan áreas en las cuales no hay información de cubiertas de vegetación oriunda.

La combinación de los elementos isobioclimáticos, geomorfológicos, geológicos y de tipos de cubiertas de vegetación actual reflejó 448 composiciones únicas. La relación Tropical pluviestacionaltermotropical subhúmedo (isobioclima), con montañas (geomorfología) y andesitas, calizas, complejos metamórficos (geología) y bosque templado (tipo de cubierta de vegetación) fue la combinación predominante cubriendo el 10.91% del estado de Michoacán.

El 40.95% del territorio michoacano, de acuerdo a INEGI (2013), se etiquetó como “sin dato”. En esta superficie, la combinación con mayor presencia fue la conformada por el isobioclima Tropical pluviestacional mesotropical subhúmedo, con elementos geomorfológicos de colinas, lomeríos altos y bajos, piedemontes y planicies, y unidades geológicas aluviales y basaltos, con el 7.3%. Las demás combinaciones presentaron valores bajos. Así, el tipo de cubierta de vegetación potencial preponderante asociado a estos polígonos "sin dato" fue el bosque templado, cubriendo el 37.80% de estas áreas. La vegetación hidrófila fue la cubierta menos representativa con el 6.33%. (Figura 3).

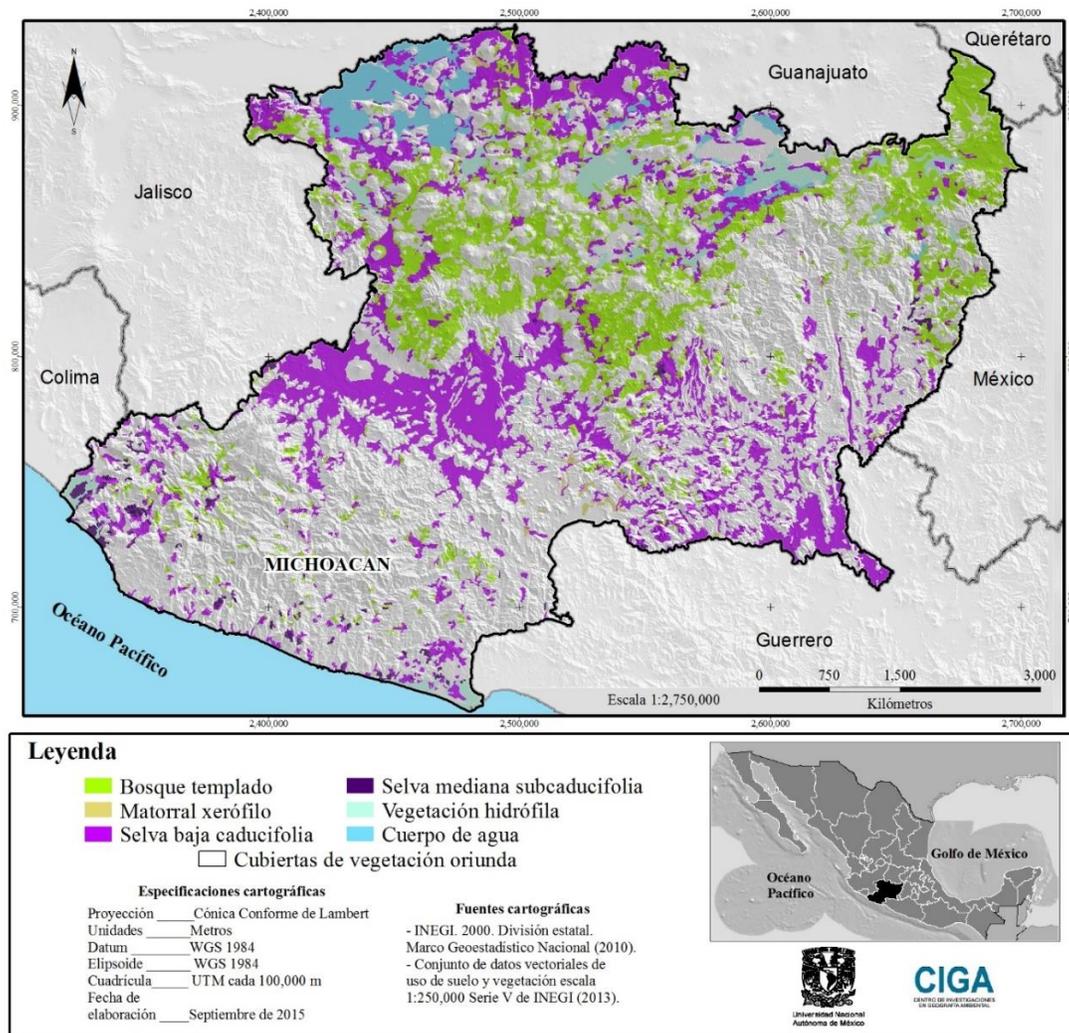


Figura 3. Cubiertas de vegetación predichas para el estado de Michoacán, México. Los espacios en blanco representan áreas en las cuales al día de hoy hay cubiertas de vegetación oriunda (ver Figura 2).

Así, la suma de los tipos de cubiertas de vegetación actual y potencial reflejó que a principios del siglo XX el estado de Michoacán presentaba dos tipos de cubiertas de formaciones de vegetación preponderantes en su territorio: la selva baja caducifolia y el bosque templado (abarcando el 47.20% y el 42.69% del territorio michoacano respectivamente) (Tabla 2, Figura 4).

Tabla 2. Superficie presente en los tipos de cubiertas de vegetación actual; las superficies adicionales de vegetación potencial son los sitios con cubiertas preponderantemente antrópicas actuales en el estado de Michoacán, México (INEGI 2013).

Tipo	Actual		Potencial		Total	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Selva baja caducifolia	1,671,156	28.52	1,094,437	18.68	2,765,593	47.2
Bosque templado	1,624,006	27.71	877,751	14.98	2,501,757	42.69
Selva mediana subcaducifolia	147,385	2.52	41,562	0.71	188,947	3.23
Cuerpo de agua	77,786	1.33	142,487	2.43	220,273	3.76
Vegetación hidrófila	12,970	0.22	146,925	2.51	159,895	2.73
Matorral xerófilo	4,644	0.08	18,791	0.32	23,435	0.4
Total	3,537,947	60.38	2,321,953	39.62	5,859,900	100

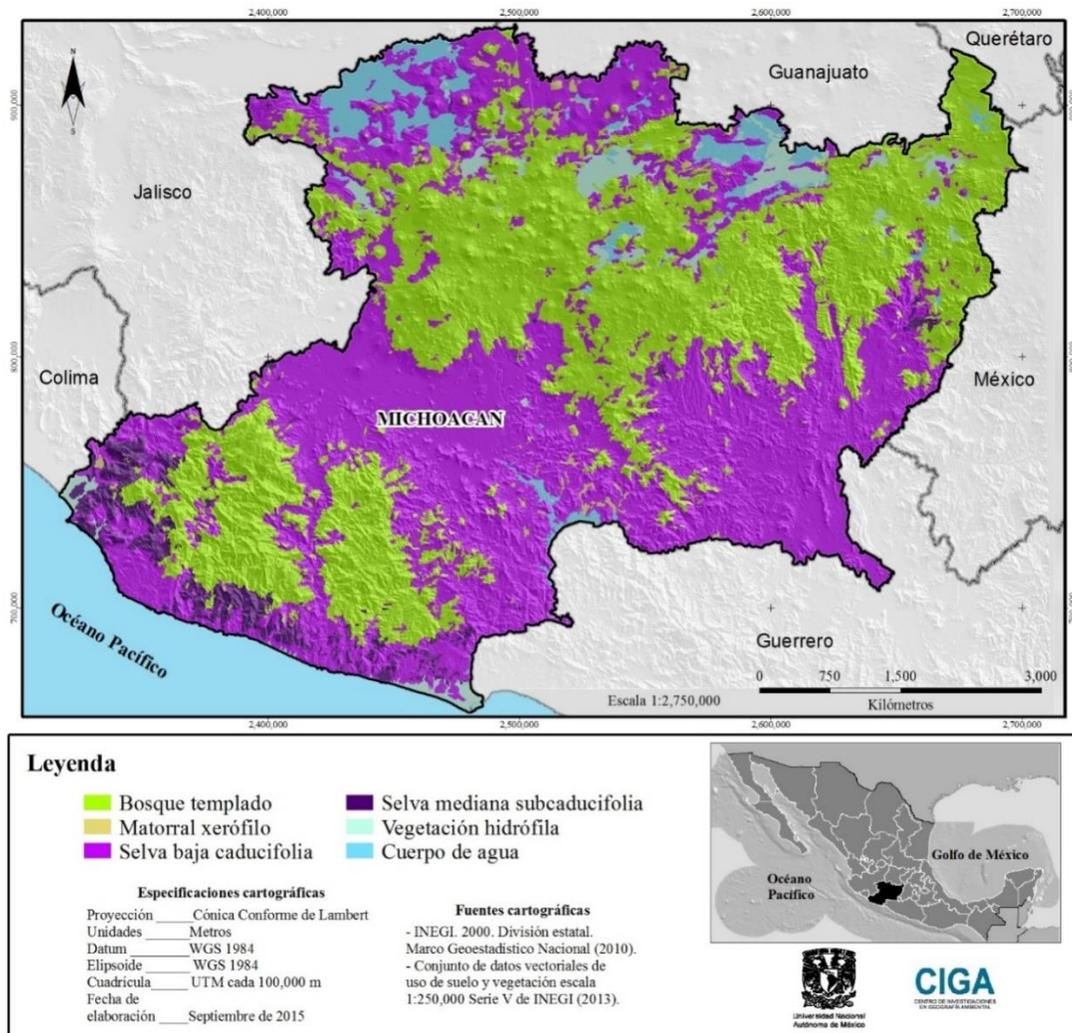


Figura 4. Tipos de cubiertas de vegetación actual y potencial presentes en el estado de Michoacán, México.

5. Discusión y conclusiones

Este estudio permitió predecir, con base en isobioclimas, geomorfología y geología que el Estado de Michoacán, hacia principios del siglo XX, estaba cubierto en su mayoría por selvas bajas caducifolias y bosques templados. De acuerdo a Bocco et al., (2001) estas dos últimas categorías de cubiertas de tipos de vegetación se ubican en relieves con un grado importante de pendiente (colinas, lomeríos y montañas) dentro del estado de Michoacán, y que a su vez, son las de mayor impacto sufrido por actividades antrópicas. Los resultados mostrados por este último autor se ven reflejados en el presente estudio, que si bien no analizó de manera directa cambios de cubiertas y

usos del suelo, las áreas potenciales de tipos de cubiertas de vegetación coinciden con lo expuesto por Bocco y colaboradores (op cit.).

Michoacán es considerado un estado que alberga un alto grado de diversidad biológica, no obstante, a niveles más específicos, son pocos los estudios que comprenden la complejidad ecogeográficas de la zona (Blancas-Calva, Navarro-Sigüenza, & Morrone, 2010). Por lo tanto, los resultados de la presente investigación reflejan que la gran riqueza biológica presente en la región es producto de, en gran medida, de su variedad geológica, de su compleja geomorfología, de su privilegiada ubicación geográfica y, consecuencia de los anteriores puntos, de la presencia de una gran diversidad de climas. Es así que por ejemplo, los bosques templados albergan subformaciones complejas como son los bosques mesófilos y los bosques de encino, ambos con una riqueza excepcional de componentes de filiación templado y tropical. Esto último respalda y es un ejemplo de lo expuesto por lo estudiado por Morrone (2010), en el cual se hace evidente que la zona es un área biogeográfica compleja, donde las zonas de transición de biota Neártica y Neotropical se sobreponen. Adicionalmente, los matorrales xerófilos, integrados por bosques espinosos, zonas dominadas por cactáceas y matorrales arbóreos, y las selvas bajas caducifolias (sensu Rzedowski 2006), son una fuente de germoplasma únicas. La selva mediana subcaducifolia, los manglares, las zonas lacustres y otras de misma proporción a esta riqueza siguen aún sin ser debidamente documentadas. Esta complejidad de gradientes (que van de lo templado a lo tropical y de lo seco a lo húmedo) contiene una riqueza de la topo diversidad que es particularmente valiosa para su predicción.

En síntesis, esta contribución se considera robusta a escala regional (1:250,000) y la predicción de cubiertas de vegetación puede perfeccionarse a escalas más finas si se toman en cuenta atributos como orientación de las laderas y pendientes. Nuestros resultados son respaldados por lo mostrado por Cué-Bär et al. (2006), en la que exponen una distribución de la vegetación similar a lo mostrado en la presente investigación con los tipos de cubiertas de vegetación. Del mismo modo, los autores previamente referidos hacen notar la importancia de las selvas bajas caducifolias, seguidas de los bosques templados, como las principales categorías que guardan una gran diversidad biológica en la zona. Esto último provocado en gran medida, de acuerdo a los mismos

autores, a la compleja geología presente en el estado, además de su gran variedad de geoformas, su privilegiada ubicación biogeográfica y su amplia variedad de climas existentes en la zona. En contraste, nuestros resultados resultan opuestos a la cartografía distribuida actualmente por Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2001), desprendida de lo reportado por Rzedowski (1990). Las causas de las diferencias son diversas, a saber:

(1) La escala cartográfica del mapa base utilizado en México hasta el momento es macro-regional (1:4,000,000), en tanto que el propuesto en el presente estudio es regional (1:250,000).

(2) La ruta metodológica del mapa realizado por Rzedowski (1990) es inductivo lo que deja a la experiencia del autor la interpretación de las probables cubiertas en territorios donde ya no existen.

(3) El uso de herramientas e insumos actuales supera el potencial que existió en la propuesta anterior.

Los resultados aquí expuestos resumen patrones climáticos, que afinados con la presencia de elementos geofísicos (geoformas y geología), ayudan a elucidar su relación con las cubiertas de vegetación actual y potencial. No obstante, el clima es el principal factor que define los patrones de distribución de las cubiertas de vegetación a mesoescala y por ende existe una relación estrecha entre patrones climáticos y patrones de vegetación. El análisis bioclimático, expresado en isobioclimas, es robusto por permitir identificar nichos geocológicos donde la relación clima-vegetación es estrecha y por ende funge como reglas de decisión en un marco de predicción bajo la lógica Booleana. Otros insumos de clasificación climática como el que prevalece en México (García, 2004), aluden a criterios donde en lugares el clima define patrones de vegetación y lugares donde la vegetación define patrones climáticos aún a la misma escala (Sánchez &

Garduño, 2008); en consecuencia la expresión cartográfica es resultado de un efecto tautológico que para el rigor académico es inaceptable.

A manera de conclusión, este artículo presenta una ruta replicable que permite reproducir este enfoque de predicción a otras regiones. El resultado final representa una línea base a partir de la cual se puede predecir el impacto de acciones antrópicas sobre el capital natural. Por ejemplo, poder responder a preguntas como ¿cuál será el impacto del cambio climático sobre el capital natural? ¿Cuáles son los patrones de deforestación predecibles? ¿Cómo identificar las áreas de vulnerabilidad en áreas de oportunidad a través de acciones de buen manejo de los recursos naturales?

6. Literatura citada

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

Aguirre de Cárcer, Í., & Carral, P. (2009). *Apuntes de meteorología y climatología para el medio ambiente*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.

Antaramián-Harutunian, A., & Correa-Pérez, G. (2003). Fisiografía. In G. Correa-Pérez (Ed.), *Atlas geográfico de Michoacán* (pp. 42–46). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Educación de Michoacán, El Colegio de Michoacán.

Antaramián-Harutunian, E. (2005). Clima. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 25–28). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Barco, C. (2005). *Álgebra booleana. Aplicaciones tecnológicas*. Manizales, Colombia: Universidad de Caldas. Retrieved from http://books.google.es/books?id=x4EZbp4gnwgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Blancas-Calva, E., Navarro-Sigüenza, A., & Morrone, J. (2010). Patrones biogeográficos de la avifauna de la Sierra Madre del Sur. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, (81), 561–568. Retrieved from https://www.academia.edu/1049063/Patrones_biogeogr%C3%A1ficos_de_la_avifauna_de_la_Sierra_Madre_del_Sur

Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en

- Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, (44), 18–38. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n44/n44a3.pdf>
- Bocco, G., Mendoza, M., & Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39(3-4), 211 – 219. <http://doi.org/10.1016/0169-555X>
- Box, E. O. (1996). Plant functional types and climate at the global scale. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 309–320. <http://doi.org/10.2307/3236274>
- Braun-Blanquet, J. (1979). *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Madrid, España: Blume.
- Cabrera, A., González, J., & Ayala, J. (2005). Los suelos. In L. Villaseñor (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 29–31). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carranza, E. (2005). Vegetación. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 38–46). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental*. (3rd ed.). Barcelona: Ariel. Retrieved from <http://www.slideshare.net/jaiflo7503/teledeteccion-ambiental-listo>
- Claussen, M. (2004). Introduction. In P. Kabat, M. Claussen, P. A. Dirmeyer, J. H. C. Gash, L.

- Bravo de Guenni, M. Meybeck, ... S. Lutkemeier (Eds.), *Vegetation, water, humans and the climate* (pp. 1–8). Berlin, Germany: Springer.
- CNA. (2009). *Programa hídrico visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from <http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/estadisticas2008/PHV2030EMICHOACAN2009,julio09.pdf>
- CONABIO. (2001). Vegetación potencial. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/vpr4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Cué-Bär, E., Villaseñor, J. L., Arredondo, L., Cornejo, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (78), 47–81. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57707806>
- del Río, S. (2005). El cambio climático y su influencia en la vegetación de Castilla y León (España). *Itinera Geobotánica*, (16), 534.
- Driese, K., Reiners, W., Merrill, E. ., & Gerow, K. (1997). A digital land cover map of Wyoming, USA: a tool for vegetation analysis. *Journal of Vegetation Science*, 8(1), 133–146. <http://doi.org/10.2307/3237251>
- FAO. (2000). Land cover classification system (LCCS): classification concepts and user manual. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>
- Fernández-González, F. (2004). Bioclimatología. In J. Izco, E. Barreno, M. Brugués, M. Costa, J. A. Devesa, F. Fernández-González, ... B. Valdés (Eds.), *Botánica* (2nd ed., p. 906). Madrid,

España.

Foody, G. (2008). GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 32(2), 223–235. <http://doi.org/10.1177/0309133308094656>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5th ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

Giffard, B., Jactel, H., Corcket, E., & Barbaro, L. (2012). Influence of surrounding vegetation on insect herbivory: A matter of spatial scale and herbivore specialisation. *Basic and Applied Ecology*, 13(5), 458–465. <http://doi.org/10.1016/j.baae.2012.08.004>

Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & Giménez A, J. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 5(11). Retrieved from <http://www.esajournals.org/loi/ecsp>

Hearn, S. M., Healey, J. R., McDonald, M. A., Turner, A. J., Wong, J. L. G., & Stewart, G. B. (2011). The repeatability of vegetation classification and mapping. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1174–84. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.021>

Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. Retrieved from <http://cct.or.cr/publicaciones/Life-Zone-Ecology.pdf>

INAFED. (2010). Michoacán de Ocampo. Retrieved from <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM16michoacan/mediofisico.html>

INEGI. (1984). Mapa geológico de México a escala 1:250,000. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/>

INEGI. (2011). *Panorama sociodemográfico de Michoacán de Ocampo*. Aguascalientes: Instituto Naciona de Estadística y Geografía.

INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/Default.aspx>

Israde, I. (2005). Los cuerpos de agua. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 32–37). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P., Gash, J., Bravo de Guenni, L., Meybeck, M., ... Lutkemeier, S. (2004). *Vegetation, water, humans and the climate*. (K. Pavel, C. Martin, D. Paul A., G. John H. C., B. de G. Lelys, M. Michel, ... L. Sabine, Eds.) (1st ed.). Germany: Springer.

Kent, M., & Coker, P. (2012). *Vegetation description and data analysis: a practical approach*. (2nd ed.). Oxford, UK: Wiley-Black Well.

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology* (4th ed.). Berlin, Germany: Springer. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BgtzD4frr98C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Larcher,+W.+2003.+Physiological+Plant+Ecology.+4th+ed.+Springer.+Berlin&ots=11YZOjwg>

3M&sig=82lhT-L1UJURsvr73AyPMYHy31o#v=onepage&q&f=false

Magle, S. B., & Crooks, K. R. (2008). Interactions between black-tailed prairie dogs (*Cynomys ludovicianus*) and vegetation in habitat fragmented by urbanization. *Journal of Arid Environments*, 72(3), 238–246. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.003>

McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2005). *A Climate Modelling Primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/0470857617>

Mendoza, M., Velázquez, A., Larrazábal, A., & Toledo, A. (Eds.). (2010). *Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec*. D.F., México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Instituto Nacional de Ecología.

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. Retrieved from [http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM_87/MS1018/Miranda y Hernandez-X_1963 \(BSBM28_29-176\)_sobretiro-e .pdf](http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM_87/MS1018/Miranda_y_Hernandez-X_1963_(BSBM28_29-176)_sobretiro-e.pdf)

Morrone, J. (2010). Fundamental biogeographic patterns across the Mexican Transition Zone: an evolutionary approach. *Ecography*, (33), 355–361. <http://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06266.x>

Odum, E. P. (2006). *Fundamentos de ecología* (5th ed.). México, D.F.: Thomson. Retrieved from <http://botanicaenvenezuela.blogspot.mx/2014/10/libro-fundamentos-de-ecologia-autores.html>

Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J.-F., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., ... Gonzalez Medrano, F. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas*, (43), 183–

203.

Pedrotti, F. (2013). *Plant and Vegetation Mapping*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-30235-0>

Peinado, M., Monje, L., & Martínez, J. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla - La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto centenario. Retrieved from http://foto.difo.uah.es/geobotanica/acta_botanica_mexicana.html

Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg110001>

Rzedowski, J. (1990). Vegetación potencial. Catálogo de metadatos geográficos. Retrieved from www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/vpr4mgw.xml?_htptcache=yesy_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsly_indent=no

Rzedowski, J. (2004). Flora y vegetación silvestres. In *Atlas geográfico de Michoacán* (p. 308). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Educación de Michoacán, El Colegio de Michoacán.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Sánchez, N., & Garduño, R. (2008). Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *ContactoS*, (68), 5–10. Retrieved from <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/index.php/Numeros-antteriores.html>

SEMARNAP-UNAM (Ed.). (2000). *Inventario Nacional Forestal del año 2000*. UNAM. D.F.,

México.

Steffen, W. L., Cramer, W., Matthias, P., & Bugmann, H. (1996). Global vegetation models: incorporating transient changes to structure and composition. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 321–328. <http://doi.org/10.2307/3236275>

Sulaiman, S., Mohamad, N. H. N., & Idilfitri, S. (2013). Contribution of Vegetation in Urban Parks as Habitat for Selective Bird Community. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 85, 267–281. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.358>

Thorntwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <http://doi.org/10.2307/210739>

van der Maarel, E. (2005). Vegetation ecology – an overview. In E. van der Maarel (Ed.), *Vegetation Ecology* (p. 411). Padstow, United Kingdom: Blackwell Science Ltd.

Velázquez, A., Cué-Bär, E., Larrazábal, A., Sosa, N., Villaseñor, J., McCall, M., & Ibarra-Manríquez, G. (2009). Building participatory landscape-based conservation alternatives: A case study of Michoacán, Mexico. *Applied Geography*, 29(4), 513–526. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.11.001>

Velázquez, A., Mas, J., Bocco, G., & Palacio-Prieto, J. (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. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9493.2010.00398.x>

Velázquez, A., Mas, J., Díaz, G., Mayorga, S., Alcántara, P., Castro, R., ... Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21–37.

Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906202>

Velázquez, A., Sosa, N., Navarrete, J., & Torres, A. (2005). *Bases para la conformación del sistema de áreas de conservación del estado de Michoacán*. (1st ed.). Morelia, Michoacán: Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Nacional Autónoma de México.

Victoria-Hernández, A., Niño-Alcocer, M., Rodríguez-Avalos, J. A., & Argumedo-Espinoza, J. A. (2011). Generación de Información de Uso del Suelo y Vegetación Proyectos y Convenios escala 1:50 000. In *XIII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*. Toluca, México: INEGI. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_ibero/doc/ET6_46_HERNÁNDEZ.pdf

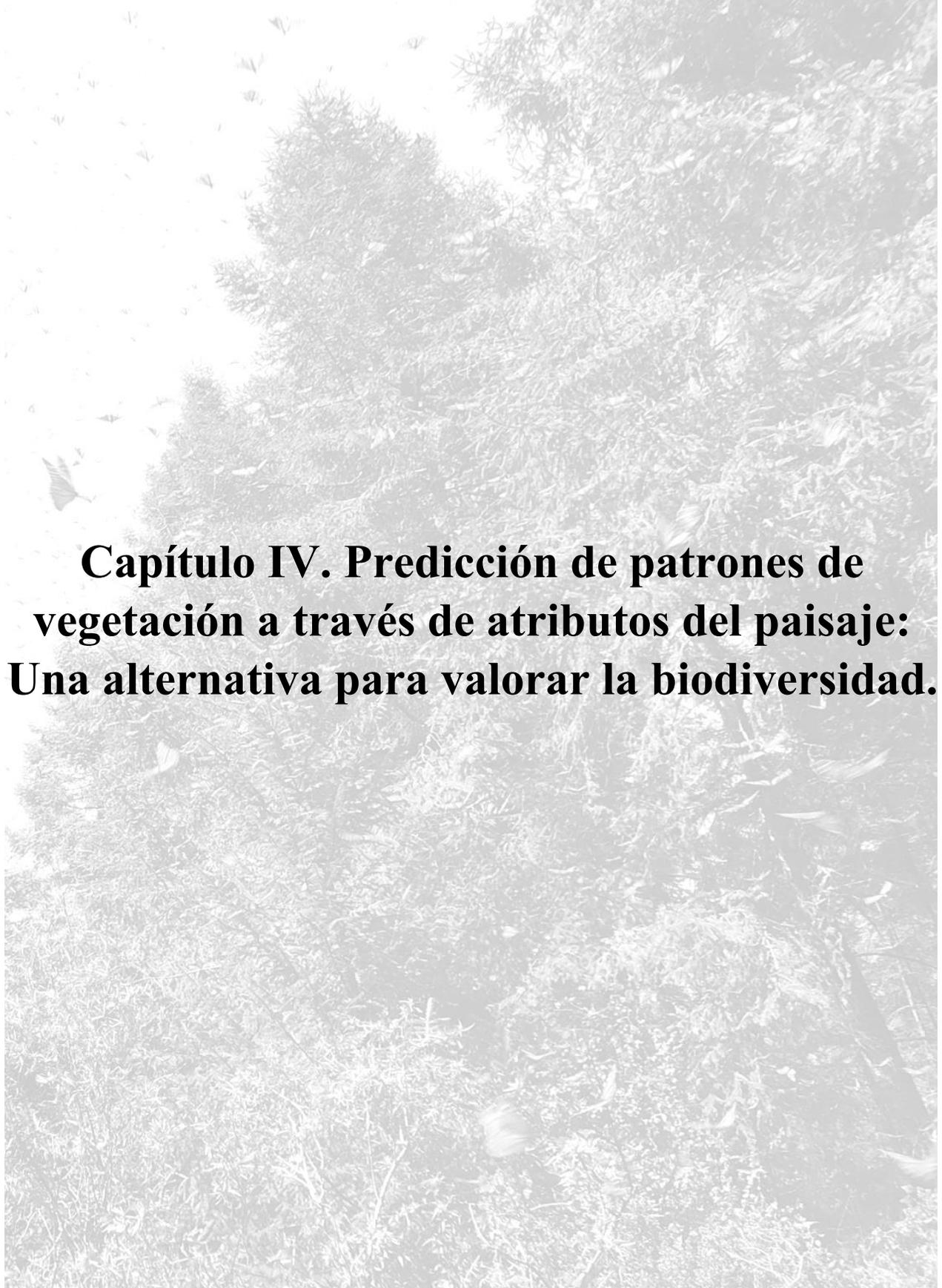
Villaseñor, J., & Ibarra-Manríquez, G. (1998). La riqueza arbórea de México. *Boletín Del Instituto de Botánica de La Universidad de Guadalajara*, 3(5), 95–105.

Villaseñor, L. (Ed.). (2005). *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de caso*. Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/EE_MICHOACAN_2005.pdf

Villaseñor, L., & Benítez, H. (2005). Introducción. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 15–20). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Walter, H. (1985). *Vegetation of the Earth and ecological systems of the geobiosphere*. (3rd ed.). Berlin, Germany: Springer.

Walter, H. (1994). *Vegetation of the Earth and ecological systems of the geobiosphere*. Berlin, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.



**Capítulo IV. Predicción de patrones de
vegetación a través de atributos del paisaje:
Una alternativa para valorar la biodiversidad.**

1. Introducción

Indiscutiblemente, la vida en el planeta Tierra depende, en gran medida, a la vegetación por ser el componente que da estructura y función a los procesos que subyacen a la biósfera (van der Maarel, 2005). La vegetación es el principal proveedor de bienes materiales y servicios a los seres humanos (Kabat et al., 2004). Lo anterior hace que su estudio y evaluación se haya vuelto indispensable; y por ende se le considere el mejor activo que tiene la Tierra (Alcamo et al., 2003). La vegetación no es estable ni estática, se ajusta, adapta y co-evolucionan constantemente (Gauch & Whittaker, 1972; Velázquez et al., 2002). Es por esto que el estudio de la relación clima-vegetación, así como de los factores que influyen esta relación, cobró enorme relevancia a principios del siglo XX y se mantuvo al menos durante tres décadas (e.g., Clements 1916; Whittaker et al. 1974). Los factores mencionados, son aquellos que desencadenan medidas de ajuste en la vegetación y se clasifican en intrínsecos (e.g., diversidad, competencia, forma de vida) y extrínsecos (e.g., clima, geología, relieve, suelos, agua). Durante las últimas décadas, el papel del hombre como agente extrínseco detonador de grandes cambios, ha sido sin precedente (Benning, LaPointe, Atkinson, & Vitousek, 2002; Lambin & Meyfroidt, 2010). Actualmente es incuestionable que el hombre es el agente que mayor impacto ha generado sobre el clima dando lugar al hecho conocido como cambio climático (IPCC, 2013). Por lo anterior, el estudio exhaustivo de la relación entre el clima y la vegetación, en estructura y composición, vuelve a ser un tema de interés mundial (Sykes, 2009).

El estudio de la dinámica de la vegetación, *per se*, no permite entender las medidas de acoplamiento que subyacen entre los factores (intrínsecos y extrínseco) como agentes detonadores de cambio de las comunidades vegetales como variables de respuesta (Foody, 2008). El clima, desde hace décadas, fue identificado como principal elemento moldeador de la estructura, función y distribuidor de vegetación sobre la superficie terrestre (Walter, 1985). No obstante, el pensamiento tautológico que nos lleva a tipificar especies vegetales como indicadores de disturbio, mismas especies que a su vez son favorecidas por el mencionado disturbio, ha oscurecido la comprensión de los factores detonantes del cambio y las respuestas de las comunidades vegetales (Gaston & Fuller, 2007; Reyers et al., 2009; Villaseñor G. & Benítez D., 2005). Este pensamiento ha sido recurrente en la mayoría de los enfoques que estudian la dinámica y los patrones de distribución de clima. Los trabajos realizados por Thornthwaite (1948) para Norte América, de

Holdridge(1967) para América Central y Sudamérica, de Köppen modificado por García (2004) para México y de Rivas-Martínez et al. (2011), para España (del Río, 2005; Gonzalo, 2010), Estados Unidos (Cress, Sayre, Comer, & Warner, 2009), algunas regiones de México (Macías, Peinado, Giménez, Aguirre, & Delgadillo, 2014; Giménez, Macías, & Gopar-Merino, 2013; Peinado, Macías, Aguirre, & Rodríguez, 2010) y América del Sur (Costa et al., 2007; Navarro, 1997), son ejemplos de aproximaciones al estudio de la vegetación como parte fundamental para entender su dinámica. La mayor parte de las aproximaciones antes señaladas respondieron a realidades locales o regionales para las cuales fueron formuladas, carecen de validez universal y por ende no son replicables. Adicionalmente, la gran mayoría se desprende de promedios anuales de la relación temperatura-precipitación y carecen de una expresión cartográfica robusta y replicable. Todo esto se explica, en parte, por las limitadas herramientas de análisis sobre las que muchas de las aproximaciones anteriores se basaron. Hoy día, el acceso a enormes bases de datos, tanto climáticas como florísticas y cartográficas, disponibles en versiones digitales con múltiples escalas, y a una capacidad de análisis mayor cada año, postula nuevos desafíos (Allen, Wang, & Crawford, 2013; Foody, 2008; Gopar-Merino, Velázquez, & Giménez A, 2015; Pérez, Mas, Velázquez, & Vázquez, 2008; Rivas-Martínez et al., 2011).

La bioclimatología (*sensu* Rivas-Martínez et al., 2011) no ha escapado del todo de este pensamiento tautológico puesto que se basa en distinguir biotipos (especies de árboles nativos) correlacionados con patrones climáticos; y éstos mismos, a su vez, son forzados a estar incluidos en las categorías de distribución de los biotipos identificados (del Río, 2005). Esta situación conlleva a otra de las limitaciones detectadas en la aproximación bioclimatológica, que es la expresión cartográfica, la cual ha sido definida por esta relación biotipo-clima sin poder saber a ciencia cierta cuál es el factor limitante y la variable de respuesta.

En contraste con los argumentos del párrafo anterior, la enorme facultad del enfoque de la bioclimatología se funda en el análisis de niveles de umbral expresados en índices de precipitación y de temperatura de los meses en los cuales las plantas sufren mayor estrés fisiológico a causa de la sequía, de la humedad, de lo caliente o frío del medio (Rivas-Martínez, et al., 2011). En la presente investigación se planteó el desafío de elaborar escenarios bioclimatológicos de una región

como base para la elaboración de expresiones cartográficas de umbrales bioclimáticos. Éstos últimos se refieren a gradientes de temperatura (termotipos) y de precipitación (ombrotipos) que se distinguen por diferentes niveles de estrés fisiológico en la vegetación preponderantemente arbórea (Peinado et al., 2010; Rivas-Martínez et al., 2011). El resultado, aunado a la disponibilidad de bases de datos digitales en formato raster, ha probado ostentar ventajas para la correcta expresión cartográfica de los gradientes bioclimáticos (Gopar-Merino et al., 2015), independientemente de los patrones de distribución de los tipos de vegetación (Gopar-Merino & Velázquez, 2016). Los avances en la predicción de tipos de vegetación a nivel de comunidades arbóreas, tanto en regiones antropizadas como en la construcción de escenarios producto de las predicciones del cambio climático, son temas aun pobremente documentados. Así, los objetivos del presente trabajo son: 1) establecer comunidades arbóreas producto de su estrecha relación con los elementos del clima; 2) identificar la relación existente entre componentes geofísicos (clima, geomorfología y geología) y elementos bióticos (representados por comunidades arbóreas) y 3) desarrollar una aproximación cartográfica que refleje la distribución potencial de las comunidades arbóreas.

2. Métodos

2.1. Área de estudio

El estudio fue realizado en el estado de Michoacán, el cual tiene una extensión territorial de 58,599 km², representando el 3% de la superficie total del país (INEGI, 2011). En el estado convergen dos regiones biogeográficas, la Neártica y la Neotropical (Morrone, 2010; Rzedowski, 1991). La orografía del territorio michoacano está integrada principalmente por el Eje Volcánico Transversal (originado en el periodo Cuaternario) y la Sierra Madre del Sur (originado en el periodo Terciario). Estas cadenas montañosas, a su vez, presentan una gran ramificación dentro del estado, haciendo que el área de estudio sea una de las zonas más montañosas de México (CNA, 2009; Israde, 2005). Lo accidentado del territorio hace que haya una gran variación altitudinal, misma que va desde los cero metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta los 3,840 msnm en su parte más elevada, en la que se ubica el Pico del Tancítaro (Antaramián-Harutunian & Correa-Pérez, 2003). Asimismo, el estado cuenta con 14 de los 18 diferentes tipos principales de suelos reportados para México, siendo el Leptosol, el Regosol, el Luvisol, el Acrisol, el Andosol, el Vertisol y el Feozem los más importantes (Cabrera, González, & Ayala, 2005).

Michoacán cuenta con dos de las principales cuencas hidrológicas de México, la del Río Lerma y la del Río Balsas. El territorio cuenta a su vez con importantes cuerpos de agua, como el Lago de Cuitzeo, el Lago de la Ciénega de Zacapu y el Lago de Chapala. En el Estado los lagos de origen volcánico-tectónico de mayor relevancia son el de Pátzcuaro y Zirahuén, en tanto que los de origen cratérico son la Alberca de Zacapu, la Alberca de Teremendo y la Alberca de Tacámbaro (CNA, 2009; Israde, 2005; Mendoza, Toledo, Velázquez, Plascencia, & Garduño, 2010).

La gran diversidad geomorfológica del estado hace que exista una gran cantidad de climas. De acuerdo a Gopar-Merino et al., (2015) se reporta la presencia de 14 isobioclimas en el área, destacándose el Tropical Xérico Infratropical Seco y el Tropical Pluviestacional Mesotropical Subhúmedo.

De este modo, la intersección de las dos regiones biogeográficas, la compleja orografía, la gran variedad de suelos, pero principalmente, la manifestación de una variada presencia de climas dan como resultado que Michoacán sea considerado uno de los estados poseedores de mayor complejidad biológica dentro de la República Mexicana (Velázquez, Sosa, Navarrete, & Torres, 2005; Villaseñor G. & Benítez D., 2005). Lo anterior se ve reflejado en la biodiversidad vegetal presente en el territorio michoacano. En México se han descrito 28 tipos diferentes de comunidades vegetales, de las cuales 17 están presentes en Michoacán (Carranza, 2005; Rzedowski, 2004, 2006). Dentro de las comunidades vegetales descritas para el estado destacan los bosques de coníferas, los bosques mesófilos de montaña y los bosques tropicales caducifolios y subcaducifolios (Carranza, 2005; Rzedowski, 2004). Adicionalmente, la presencia del 50% de las familias y géneros arbóreos y el 23% de especies arbóreas reportadas en México tienen presencia en el estado (Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo, Cornejo, & Ibarra-Manríquez, 2006; Velázquez et al., 2009; J. Villaseñor & Ibarra-Manríquez, 1998). Esta gran diversidad arbórea se ve realizada si se compara a Michoacán con el continente europeo. El estado es 99.43% más pequeño que todo el continente europeo, y aun así tiene 218 más especies que el continente (845 para Michoacán vs 627 de especies arbóreas en Europa) (Hermy, Honnay, Firbank, Grashof-Bokdam, & Lawesson, 1999).

2.2. Elementos integradores del paisaje

2.2.1. Isobioclimas

La clasificación climática utilizada en el presente documento fue tomada de la descrita por Gopar-Merino et al., (2015) para el estado de Michoacán y la misma se desprende del trabajo realizado por Rivas-Martínez et al., (2011). La propuesta bioclimática de estos últimos investigadores se basa primordialmente en la toma de valores de precipitación y temperatura de los meses en los cuales las plantas presentan mayor estrés por efecto de la sequía, por exceso o escases de agua y por el exceso de calor o frío extraordinario (Rivas-Martínez et al., 2011).

El trabajo realizado por Gopar-Merino et al., (2015) consistió en cartografiar la complejidad climática presente en el estado de Michoacán, tomando en cuenta el Atlas Climático Digital de México (ACDM) (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, & Lobato, 2012). Las bases de datos del ACDM se encuentran disponibles en formato raster y, para el presente estudio, se tomaron en cuenta las capas de los promedios mensuales y anuales de precipitación y temperatura del periodo comprendido entre 1902 a 2011. Las capas raster fueron analizadas en el SIG ArcGIS 9.3, en el cual se realizó el cálculo de los diversos índices bioclimáticos que fueron la base para la construcción de las diferentes categorías climáticas localizadas en el área de estudio. Los autores identificaron para el estado de Michoacán un macrobioclima (Tropical), tres bioclimas (pluvial, pluviestacional y xérico), cuatro termotipos (infratropical, termotropical, mesotropical y supratropical) y cinco ombrotipos (semiárido, seco, subhúmedo, húmedo e hiperhúmedo). Los isobioclimas (combinación del macrobioclima, de un bioclima, de un termotipo y de un ombrotipo) identificados en el estado fueron 14.

2.2.2. Geoformas

Los datos geomorfológicos del estado de Michoacán provinieron de la investigación realizada por Bocco et al., (2001). El resultado de su investigación provino del estudio cartográfico de mapas de INEGI de la topografía y litología del estado, a una escala 1:50,000 para tener un mapa de salida a una escala de 1: 250,000. El resultado del análisis regional arrojó la presencia de ocho geoformas

predominantes, destacando las siguientes: Altiplanicies, Colinas, Lomeríos altos, Lomeríos bajos, Montañas, Piedemontes y Planicies.

2.2.3. Geología

De acuerdo a lo reportado por INEGI (1984) en su mapa geológico de México, la parte correspondiente al estado de Michoacán reporta la presencia de 23 unidades principales de tipos de rocas y estructuras geológicas de origen tectónico provocados por volcanes, fallas y fracturas principalmente. Entre los tipos de rocas identificados se encuentran los siguientes: aluviales, andesitas, areniscas, basalto, brecha sedimentaria, brecha volcánica, caliza, complejo metamórfico, conglomerados, dacitas, dioritas, gabros, granitos, granodioritas, lacustres, latitas, limolitas, litoral, lutita, meta, residual, riocacita, riolita, toba, tonalita, taquita y volcanso clástico.

2.2.4. Vegetación

Del año 2010 a la fecha se han realizado 268 verificaciones de campo a lo largo del estado de Michoacán. Las verificaciones de campo siguieron la metodología propuesta por la fitosociología (Peinado, Monje, & Martínez, 2008). En cada punto de verificación se colectaron datos como: localización geográfica del punto verificado, características fisiográficas y edáficas, caracterización bioclimática, tipo de vegetación, descripción, fenología foliar dominante, cobertura arbórea, cobertura por biotipos, morfología dominante, estado de conservación y un listado florístico de las especies presentes en el área. Adicionalmente se recaudaron muestras de plantas con el fin de ser identificadas mediante claves botánicas en gabinete. Una vez determinada la taxonomía de las plantas, la información fue vaciada en base de datos digitales. De la lista fueron eliminadas todas aquellas especies que no tuvieran forma de vida arbórea y que no fueran oriundas de México. Las siguientes fases fueron trabajadas a nivel taxonómico de géneros, esto dado a que la complejidad biológica del estado asumía aumentar el esfuerzo de visitas de campo para poder tener una buena representatividad de especies. A nivel de género los muestreos ya realizados reflejaron una buena representatividad de los grupos arbóreos presentes en el estado.

2.2.5. Comunidades arbóreas

Depurada la base de vegetación, solo fueron seleccionados los levantamientos de campo que contenían los géneros escogidos para ser ingresados al SIG ArcGIS 9.3. Obtenida la capa de puntos, esta fue la base para extraer la información climática del mapa de isobioclimas del estado de Michoacán. Así fue posible obtener dos matrices de datos: levantamientos vs géneros de plantas arbóreas y levantamientos vs isobioclimas. Las tablas fueron indispensables en la realización de un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) ejecutado en el software Pc-Ord 5.31. El resultado de la exploración anterior arrojó los géneros que mejor representan una asociación arbórea con relación a los isobioclimas determinados dentro del estado de Michoacán.

2.3. Expresión cartográfica: Tipos de vegetación (Comunidades arbóreas)

Para esta fase, la capa de puntos ingresados al SIG fue depurada y solo fueron conservados los registros que contuvieran los géneros arbóreos seleccionados a través del ACC. Estos puntos fueron unidos, en el mismo SIG, con las capas de geomorfología y geología; como resultado se generó una base de datos donde los puntos de los géneros tuvieron una relación única, además de los obviamente establecidos con los isobioclimas, con alguna categoría geomorfológica y geológica.

Por otro lado, en el SIG, se llevó a cabo la sobreposición cartográfica de las capas de isobioclimas, geomorfología y geología. El resultado de lo anterior arrojó un número determinado de polígonos con características de las tres capas. Estos polígonos se analizaron en contraposición con la capa de puntos que representa los sitios, los géneros seleccionados por el ACC, los isobioclimas y las características tanto geológicas como geomorfológicas, el resultado fue una categorización, en términos de la probabilidad de ocurrencia para los géneros arbóreos registrados en los sitios. La lógica de categorización es la siguiente:

- A los polígonos que tuvieron la misma clasificación que la mostrada por alguna asociación arbórea en la capa de puntos, se le asignó la categoría “muy alta”;

- Los polígonos que registraron solo una combinación de igualdad de isobioclima, geoforma y no geología con respecto a la capa de puntos, se les colocó la categoría de asociación arbórea “alta”;
- Los polígonos que registraron una combinación de igualdad de isobioclima, geología y no geomorfología, se le colocó la categoría “buena”;
- Los polígonos que registraron una combinación de igualdad solo con los isobioclimas, fueron etiquetados con la categoría de “aceptable”
- Las áreas que no tuvieron información fueron catalogadas como “sin datos”.

3. Resultados.

3.1. Comunidades arbóreas

De los 268 levantamientos de campo realizados en el estado de Michoacán, se registraron 440 registros de especies de plantas, de las cuales solo se conservaron 256 especies, pertenecientes a 116 géneros ubicados en 228 puntos de muestreo. La base de datos de los géneros, al cruzarse con el mapa de isobioclimas elaborado por Gopar et al., (2015), tuvo correspondencia con 11 de los 14 isobioclimas, quedando sin cubrir con levantamiento de campo los isobioclimas Tropical pluvial supratropical hiperhúmedo, Tropical pluvial supratropical húmedo y el Tropical pluvial estacional infratropical húmedo.

El análisis de las matrices de “levantamientos vs géneros de plantas arbóreas” y “levantamientos vs isobioclimas con el ACC”, arrojó aquellos géneros que están mayormente relacionados con los isobioclimas (Figura 1) los cuales están registrados en la Tabla 1.

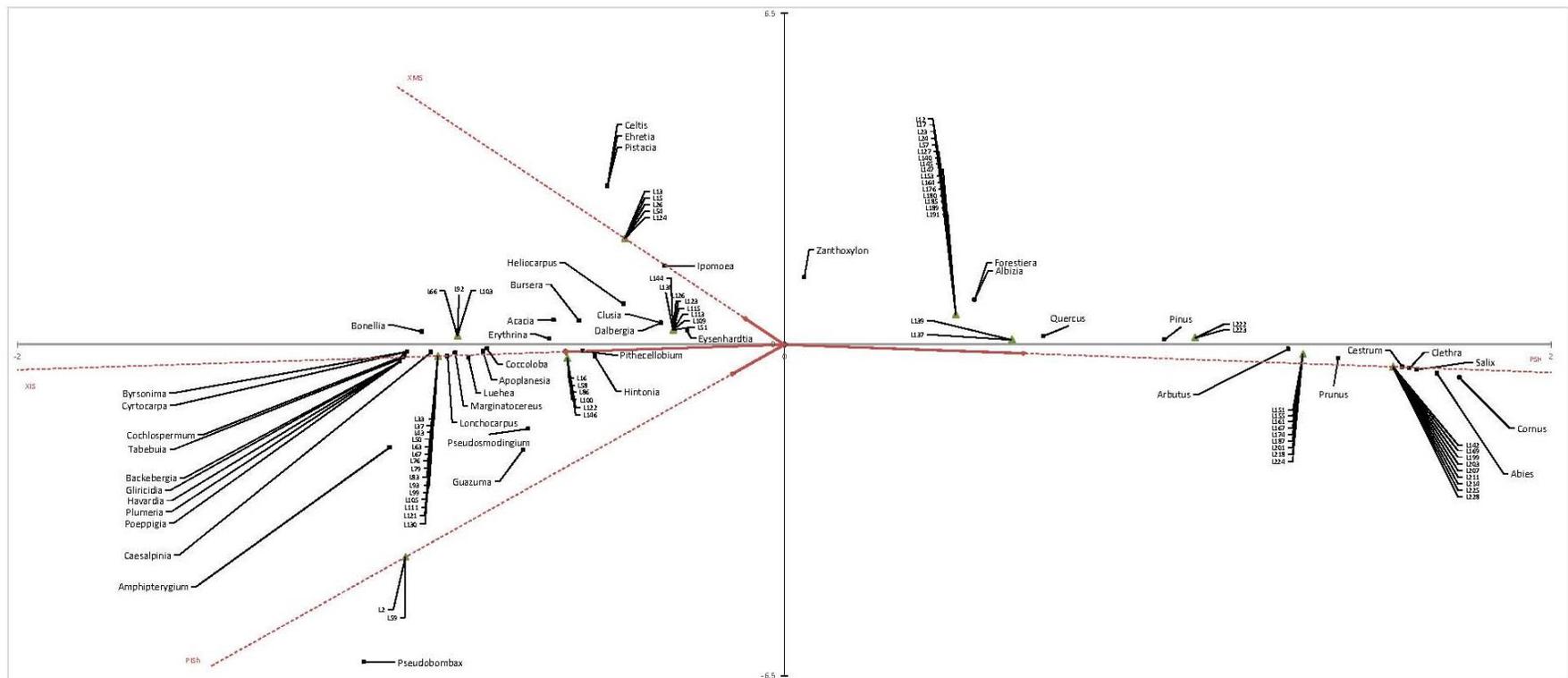


Figura 1. Relación de géneros arbóreos con isobioclimas que se desprende del Análisis de Correspondencia Canónica y que dan lugar a la identificación de comunidades arbóreas dentro del estado de Michoacán, México.

Tabla 1. Géneros vegetales que representan las comunidades arbóreas con mayor afinidad para cada isobioclima del estado de Michoacán. México.

		Tropical Xérico		Tropical Pluviestacional		
		Termodios: gradientes de temperatura				<i>Abies, Cornus,</i> <i>Salix</i>	Pinus
Supratropical	It = 160 - 322					
Mesotropical	It = 320 - 491	<i>Ehretia,</i> <i>Pistacia</i>		<i>Forestiera,</i> <i>Eysenhardtia,</i> <i>Zanthoxylon</i>	<i>Arbutus,</i> <i>Cestrum,</i> <i>Clethra</i>	
Termodios	It = 490 - 711	<i>Pithecellobium,</i> <i>Celtis,</i> <i>Dalbergia</i>		<i>Clusia,</i> <i>Dalbergia</i>	<i>Hintonia,</i> <i>Pinus,</i> <i>Quercus</i>	
Infratropical	It = 710 - >801	<i>Bonellia,</i> <i>Cyrtocarpa,</i> <i>Backebergia,</i> <i>Havardia</i>	<i>Poeppigia,</i> <i>Gliricidia,</i> <i>Tabebuia</i>	<i>Pseudobombax,</i> <i>Guazuma</i>		
		Io = 1.0 - 2.0	Io = 2.0 - 3.6	Io = 3.6 - 6.0	Io = 6.0 - 12.0	Io = 12.0 - 24.0
		Semiárido	Seco	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Ombrotipos: gradientes de precipitación						

3.2. Relación comunidades arbóreas vs componentes geofísicos del paisaje

El cruce de la ubicación de los 228 levantamientos de los componentes biofísicos (isobioclimas, geoformas y geología) evidenció la presencia de 102 diferentes combinaciones, resaltando la compuesta por el Tropical xérico infratropical seco, presente en lomeríos bajos y conformada por andesitas, seguido del Tropical pluviestacional supratropical húmedo presente en montañas y compuesto por andesitas. En tanto que el cruce de las capas de isobioclimas, geomorfología y geología expuso la aparición de 757 combinaciones diferentes, resaltando la compuesta por el Tropical pluviestacional mesotropical subhúmedo, presente en colinas y conformada por basaltos, por el Tropical

pluviestacional mesotropical subhúmedo, localizado en lomeríos altos con formaciones de basalto.

El cruce de los levantamientos de campo que contenían elementos de vegetación con los componentes del paisaje geofísico reflejó que las combinaciones más frecuentes son la asociación arbórea de *Abies-Cornus-Salix* del Tropical pluviestacional supratropical húmedo, presente en montañas con elementos de andesitas y la asociación arbórea de *Arbutus-Cestrum-Clethra* del Tropical pluviestacional mesotropical húmedo presente también en montañas con elementos de andesitas (Figura 2).

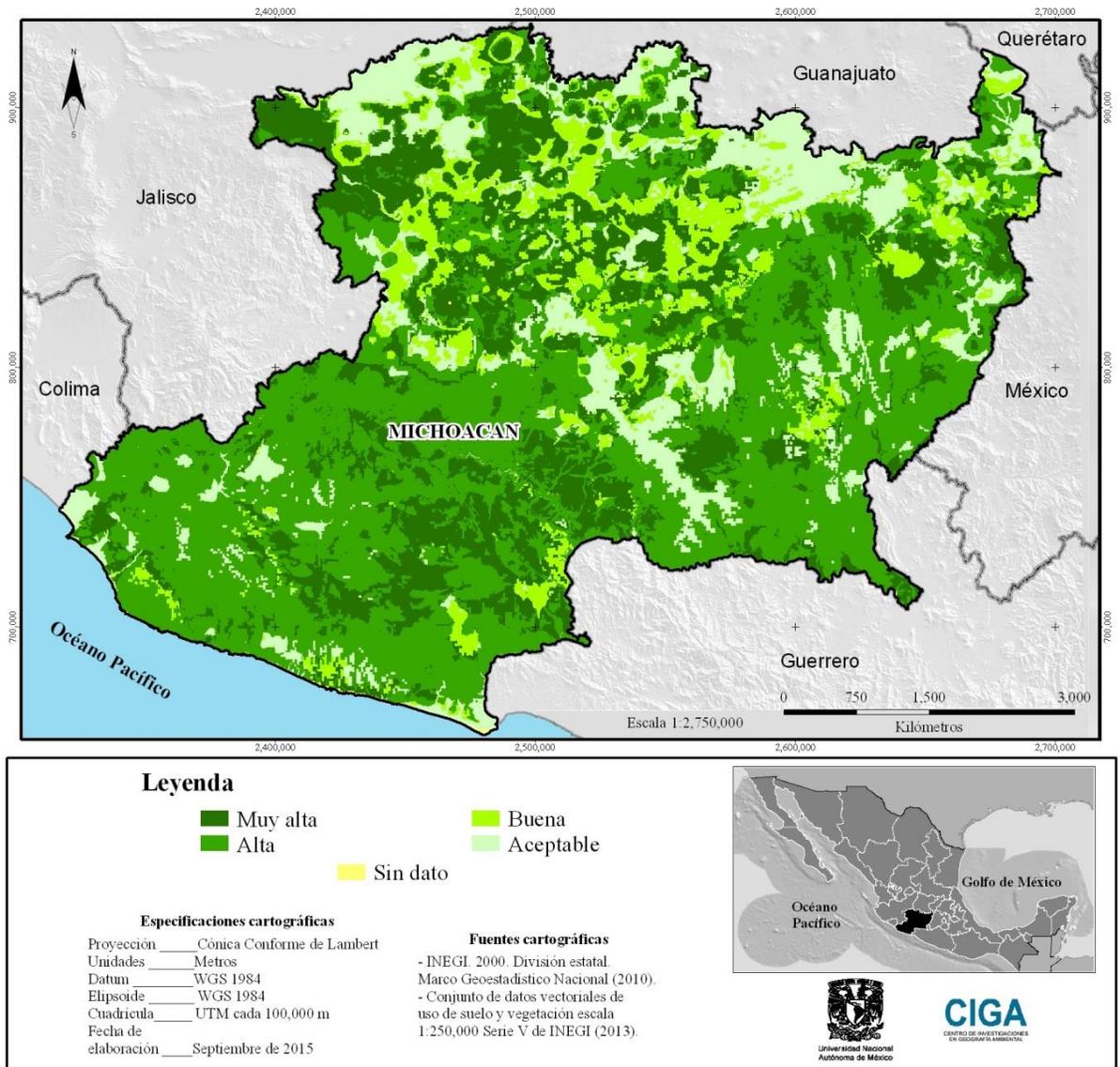


Figura 2. Mapa de la probabilidad de encontrar una Asociación arbórea dentro del estado de Michoacán, México.

4. Discusión y conclusiones

La identificación de comunidades arbóreas fue posible gracias a la estrecha relación que guardan los isobioclimas y la vegetación. Los análisis estadísticos (ACC) identificaron la relación que existe entre la vegetación y los bioclimas analizando bases de datos separadas, teniendo como único factor común su ubicación geográfica. Los trabajos realizados por Miranda y Hernández-X.(1963) y Rzedowski (1991, 2004, 2006), dos de los principales

botánicos de México, hacen evidente la correlación que existe entre las plantas y los climas de las regiones donde habitan y, sin embargo, no profundizan en el tema por no haber sido el objetivo de sus estudios. En cuanto al análisis climatológico, esta relación también se establece y en ocasiones se asume como un mismo fenómeno. Trabajos como los de SCBD (2009) y Nunes et al., (2014) establecen que el clima juega un papel importante en el establecimiento y distribución de las plantas en el planeta, en este caso nuevamente, los investigadores no profundizan y se limitan al análisis del posible impacto que tendría la biodiversidad con el cambio climático. En parte, las propuestas de clasificaciones climáticas de Thornthwaite (1948), Holdridge (1967) y Köppen modificada por García (2004) asumen que la vegetación determina categorías climáticas, señalando algo que ha sido evidente desde inicios de la documentación científica (Bennett, 1869) y que debido a los datos y herramientas con las que contaban en su momento, no pudieron establecer con mayor solidez.

La construcción de un mapa de probabilidad de ocurrencia de una asociación arbórea fue posible gracias a que se tomaron en cuenta elementos físicos del paisaje (clima, geomorfología y geología) como determinantes en la distribución de ellas. El clima es el principal factor que determina la ubicación y distribución de las plantas sobre la superficie terrestre. Así lo han afirmado autores como Walter (1985), y adicionalmente Larcher (2003) quien asevera que la regulación de la estructura, función y distribución de la vegetación está dada por este mismo elemento. Aunado a lo anterior, la geomorfología y la geología a escala regional juegan un rol importante en la predicción del establecimiento de la vegetación en zonas de montaña con alta diversidad (Pérez et al., 2008).

5. Literatura citada

- Alcamo, J., Ash, N., Butler, C., Callicott, B., Capistrano, D., Carpenter, S., ... Zurek, M. (2003). *Ecosystems and human well-being*. (W. R. Institute, Ed.). Washington, D.C., USA: Island Press. Retrieved from <http://www.millenniumassessment.org/en/Index-2.html>
- Allen, T., Wang, Y., & Crawford, T. (2013). Remote sensing of land cover dynamics. In J. Shroder & M. P. Bishop (Eds.), *Treatise on geomorphology*. (pp. 80–102). San Diego, California: Academic Press. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00046-4>
- Antaramián-Harutunian, A., & Correa-Pérez, G. (2003). Fisiografía. In G. Correa-Pérez (Ed.), *Atlas geográfico de Michoacán* (pp. 42–46). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Educación de Michoacán, El Colegio de Michoacán.
- Bennett, A. (1869). On the Fertilisation of Winter-Flowering Plants. *Nature*, *1*(1), 11–13. <http://doi.org/10.1038/001011a0>
- 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. <http://doi.org/10.1073/pnas.162372399>
- Bocco, G., Mendoza, M., & Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, *39*(3-4), 211 – 219. <http://doi.org/10.1016/0169-555X>
- Cabrera, A., González, J., & Ayala, J. (2005). Los suelos. In L. Villaseñor (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 29–31). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad,

Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Carranza, E. (2005). Vegetación. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 38–46). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Clements, F. (1916). *Plant succession; an analysis of the development of vegetation*. Washington, Carnegie Institution of Washington, <http://doi.org/10.5962/bhl.title.56234>

CNA. (2009). *Programa hídrico visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from <http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/estadisticas2008/PHV2030EMICHOACAN2009,julio09.pdf>

Costa, M., Cegarra, A., Lugo, L., Lozada, J., Guevara, J., & Soriano, P. (2007). The bioclimatic belts of the Venezuelan Andes in the State of Mérida. *Phytocoenologia*, 37(3), 711–738. <http://doi.org/10.1127/0340-269X/2007/0037-0711>

Cress, J., Sayre, R., Comer, P., & Warner, H. (2009). Terrestrial Ecosystems—Isobioclimates of the conterminous United States. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3084*, 1. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/sim/3084>

Cué-Bär, E., Villaseñor, J. L., Arredondo, L., Cornejo, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (78), 47–81. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57707806>

del Río, S. (2005). El cambio climático y su influencia en la vegetación de Castilla y León

(España). *Itinera Geobotanica*, (16), 534.

Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Lobato, R. (2012). Atlas Climático Digital de México (versión 2.0). Retrieved from <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

Foody, G. (2008). GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 32(2), 223–235. <http://doi.org/10.1177/0309133308094656>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5th ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

Gaston, K., & Fuller, R. (2007). Biodiversity and extinction: losing the common and the widespread. *Progress in Physical Geography*. <http://doi.org/10.1177/0309133307076488>

Gauch, H., & Whittaker, R. (1972). Comparison of Ordination Techniques. *Ecology*, 53(5), 868. <http://doi.org/10.2307/1934302>

Giménez, J., Macías, M., & Gopar-Merino, F. (2013). Bioclimatic belts of Sierra Madre Occidental (Mexico): A preliminary approach. *International Journal of Geobotanical Research*, 3(1), 19–35. <http://doi.org/10.5616/ijgr130002>

Gonzalo, J. (2010). *Diagnosis fitoclimática de la España peninsular* (1st ed.). España: Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Gopar-Merino, F., & Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de

cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas*. <http://doi.org/10.14350/rig.46688>

Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & Giménez A, J. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 5(11). Retrieved from <http://www.esajournals.org/loi/ecsp>

Hermý, M., Honnay, O., Firbank, L., Grashof-Bokdam, C., & Lawesson, J. E. (1999). An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implications for forest conservation. *Biological Conservation*, 91(1), 9–22. [http://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00045-2](http://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00045-2)

Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. Retrieved from <http://cct.or.cr/publicaciones/Life-Zone-Ecology.pdf>

INEGI. (1984). Mapa geológico de México a escala 1:250,000. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/>

INEGI. (2011). *Panorama sociodemográfico de Michoacán de Ocampo*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC. (2013). Resumen para responsables de políticas. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. (p. 222). Cambridge, Reino Unido; Nueva York, NY: Cambridge University Press. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

Israde, I. (2005). Los cuerpos de agua. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 32–37). Morelia, Michoacán: Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P., Gash, J., Bravo de Guenni, L., Meybeck, M., ... Lutkemeier, S. (2004). *Vegetation, water, humans and the climate*. (K. Pavel, C. Martin, D. Paul A., G. John H. C., B. de G. Lelys, M. Michel, ... L. Sabine, Eds.) (1st ed.). Germany: Springer.

Lambin, E., & Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27, 108–118. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.003>

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology* (4th ed.). Berlin, Germany: Springer. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BgtzD4fr98C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Larcher,+W.+2003.+Physiological+Plant+Ecology.+4th+ed.+Springer.+Berlin&ots=11YZOjwg3M&sig=82lhT-L1UJURsvr73AyPMYHy31o#v=onepage&q&f=false>

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. Retrieved from <http://www1.inecol.edu.mx/abm/articulos/Acta109%28133-165%29.pdf>

Mendoza, M., Toledo, A., Velázquez, A., Plascencia, H., & Garduño, V. (2010). La cuenca del río Tepalcatepec. In M. Mendoza, A. Velázquez, A. Larrazabla, & A. Toledo (Eds.), *Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec*. (pp. 8–14). D.F., México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Instituto Nacional de Ecología.

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. Retrieved

from [http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM_87/MS1018/Miranda y Hernandez-X 1963 \(BSBM28 29-176\) sobretiro-e .pdf](http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM_87/MS1018/Miranda_y_Hernandez-X_1963_(BSBM28_29-176)_sobretiro-e.pdf)

Morrone, J. (2010). Fundamental biogeographic patterns across the Mexican Transition Zone: an evolutionary approach. *Ecography*, (33), 355–361. <http://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06266.x>

Navarro, G. (1997). Contribución a la clasificación ecológica y florística de los bosques de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología Y Conservación Ambiental*, (2), 3 – 37. Retrieved from http://www.cedsip.org/PDFs/2_1navarro.pdf

Nunes, P., Kumar, P., & Dedeurwaerdere, T. (Eds.). (2014). *Handbook on the economics of ecosystem services and biodiversity*. Cheltenham, UK.: Edward Elgar.

Peinado, M., Macías, M., Aguirre, J., & Rodríguez, J. (2010). Bioclimate-Vegetation Interrelations in Northwestern Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 55(3), 311–322. <http://doi.org/10.1894/DW-121.1>

Peinado, M., Monje, L., & Martínez, J. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla - La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto centenario. Retrieved from http://foto.difo.uah.es/geobotanica/acta_botanica_mexicana.html

Pérez, A., Mas, J., Velázquez, A., & Vázquez, L. (2008). Modeling vegetation diversity types in Mexico based upon topographic features. *Interciencia*, 33(2), 88–95.

Reyers, B., O'Farrell, P., Cowling, R., Egoh, B., Le Maitre, D., & Vlok, J. (2009). Ecosystem services, land-cover change, and stakeholders: finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity hotspot. *Ecology and Society*, 14(1), 38. Retrieved from <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art38/>

Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification

system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg110001>

Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica de Mexicana*, (14), 3–21. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57401402>

Rzedowski, J. (2004). Flora y vegetación silvestres. In *Atlas geográfico de Michoacán* (p. 308). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Educación de Michoacán, El Colegio de Michoacán.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

SCBD. (2009). *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Report of the second ad hoc technical expert group on biodiversity and climate change*. Montreal, Canadá. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf>

Sykes, M. (2009). Climate Change Impacts: Vegetation. In *Encyclopedia of Life Sciences*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021227>

Thorntwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <http://doi.org/10.2307/210739>

van der Maarel, E. (2005). Vegetation ecology – an overview. In E. van der Maarel (Ed.), *Vegetation Ecology* (p. 411). Padstow, United Kingdom: Blackwell Science Ltd.

Velázquez, A., Cué-Bär, E., Larrazábal, A., Sosa, N., Villaseñor, J., McCall, M., & Ibarra-Manríquez, G. (2009). Building participatory landscape-based conservation

alternatives: A case study of Michoacán, Mexico. *Applied Geography*, 29(4), 513–526. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.11.001>

Velázquez, A., Mas, J., Díaz, G., Mayorga, S., Alcántara, P., Castro, R., ... Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, (62), 21–37. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906202>

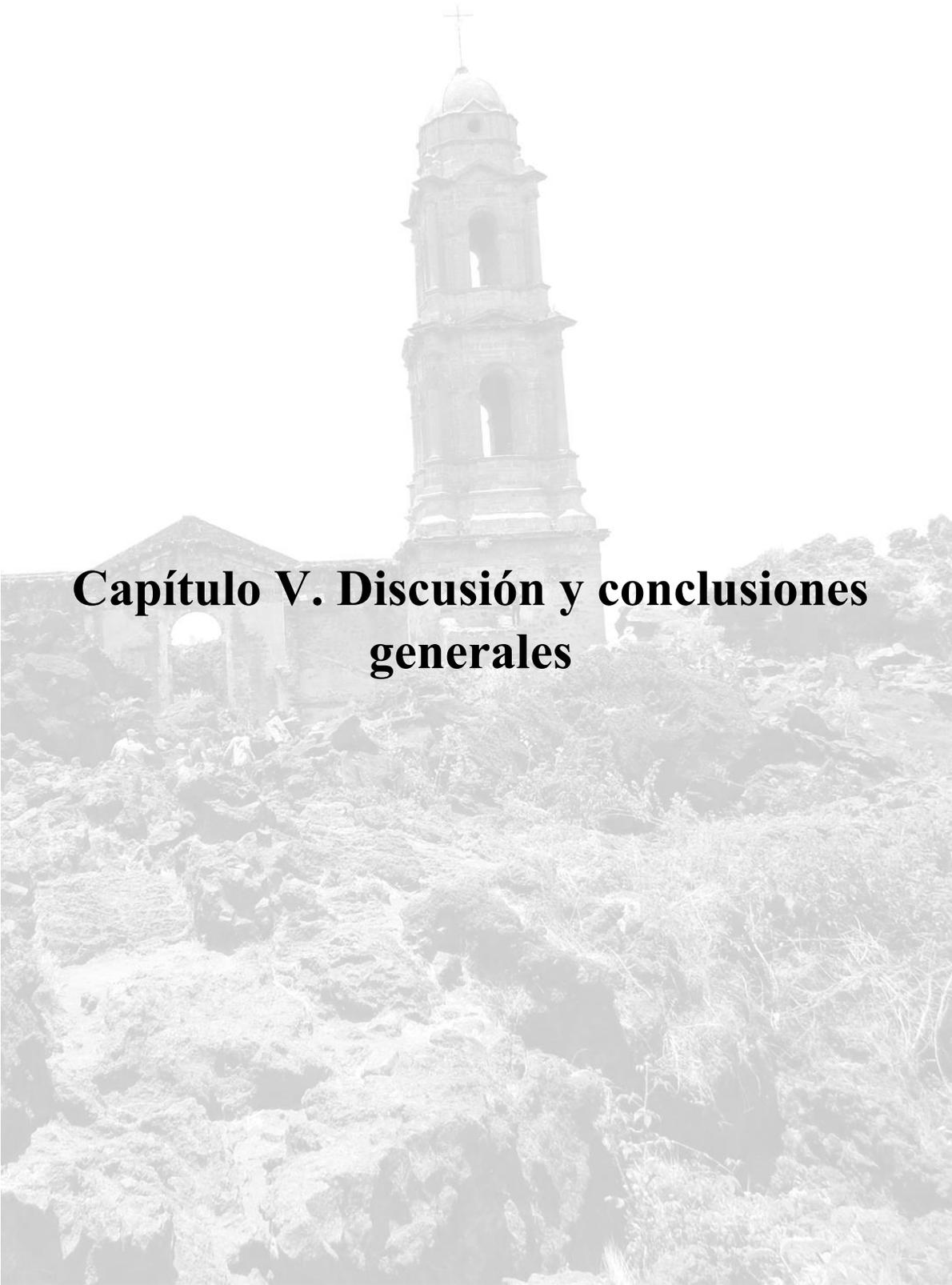
Velázquez, A., Sosa, N., Navarrete, J., & Torres, A. (2005). *Bases para la conformación del sistema de áreas de conservación del estado de Michoacán*. (1st ed.). Morelia, Michoacán: Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Nacional Autónoma de México.

Villaseñor G., L. E., & Benítez D., H. (2005). Introducción. In L. E. Villaseñor G. (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 15–20). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Villaseñor, J., & Ibarra-Manríquez, G. (1998). La riqueza arbórea de México. *Boletín Del Instituto de Botánica de La Universidad de Guadalajara*, 3(5), 95–105.

Walter, H. (1985). *Vegetation of the Earth and ecological systems of the geobiosphere*. (3rd ed.). Berlin, Germany: Springer.

Whittaker, R., Bormann, F., Likens, G., & Siccama, T. (1974). The Hubbard Brook Ecosystem Study: Forest Biomass and Production. *Ecological Monographs*, 44(2), 233. <http://doi.org/10.2307/1942313>



Capítulo V. Discusión y conclusiones generales

El mapa climático resultado de la presente investigación, refleja de manera sucinta y metodológicamente replicable, la gran diversidad de climas presentes en un Estado geoecológicamente complejo como lo es Michoacán. Así, la aproximación ayudó a expresar patrones climáticos a lo largo de gradientes altitudinales y facilitó la identificación de la distribución espacial de cada uno de ellos.

La descripción climática realizada para el estado de Michoacán, presente en los diversos trabajos de investigación que en este trabajo se detallan, parte del modelo clasificatorio realizado por Köppen, modificado por García (2004). Si bien la última revisión de dicho trabajo se adecua a los datos de las diversas estaciones meteorológicas ubicadas dentro del estado, la extrapolación realizada en el territorio michoacano no refleja las variantes climáticas propias a las características geomorfológicas del mismo y dista de ser las más precisa debido a la ambigua metodología aplicada (del Río, 2005; Sánchez & Garduño, 2008). Esto último es consecuencia a que dicho sistema clasificatorio expresa transiciones latitudinales y no las provocadas por los efectos altitudinales. Adicionalmente, el establecimiento de fronteras climáticas en el estado, mediante el uso de elementos de la vegetación, condiciona a que las categorías identificadas dependan de la distribución de plantas, la cual, tautológicamente, depende en gran medida del clima para su establecimiento.

Es así que el modelo bioclimático planteado por Rivas-Martínez et al. (2011), base de la presente disertación, difiere conceptual y metodológicamente de otras propuestas utilizadas en México, ejemplo de ello son los estudios realizados por Ruiz-Álvarez et al. (2012), en el estado de Tabasco que reflejó una descripción acorde a los supuestos que se desprenden de la propuesta de Thornthwaite. La caracterización climática del territorio tabasqueño, por lo tanto, contó con cuatro elementos importantes: la presencia de un número representativo de estaciones meteorológicas, el conocimiento de la textura y profundidad del suelo predominante en el estado, el dato de la humedad disponible en este tipo de suelo y la gran homogeneidad geomorfológica de la región. El estado de Tabasco se encuentra enclavado en la región fisiográfica “Llanura Costera del Golfo Sur” (INEGI, 2001), lo que como su

nombre indica, presenta una geomorfología casi completamente plana. Los suelos del estado del sur de México son predominantemente arcillosos con una profundidad promedio de 70 cm, con una capacidad de almacenamiento de agua de 76.3 mm. La distribución de estaciones meteorológicas en un Estado sin muchas transiciones altitudinales arrojó valores sin grandes variaciones de temperatura y precipitación (Ruiz-Álvarez et al., 2012). En el caso de Michoacán, el tratar de utilizar la propuesta de Thornthwaite resulta más complicada. Esta entidad federativa se encuentra ubicada entre dos zonas fisiográficamente muy complejas: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (INEGI, 2001). La gran irregularidad del territorio michoacano ha provocado, en consecuencia, una discontinua diferenciación altitudinal y por lo tanto, una variedad de paisajes con características físicas y biológicas muy diversa (Villaseñor, 2005). Adicionalmente, esta misma complejidad se ve reflejada en los tipos de suelos, los cuales cuentan con texturas, profundidades y calidades de retención de agua heterogéneas (Cabrera, González, & Ayala, 2005). Por otro lado, la carencia de estaciones meteorológicas y en ocasiones, la falta de calidad de sus datos, impide la extrapolación climática a todo el estado (INIFAP, 2005). Las anteriores razones son las que complican la utilización del método de Thornthwaite en la zona de estudio de la presente disertación, dado que para cumplir con las condiciones de su clasificación es necesario conocer a detalle todo el territorio, información que al día de hoy (y en un futuro próximo) no existe.

La propuesta climática de Köppen, modificada por García (2004), ha sido la de mayor difusión, uso y consulta en la República Mexicana. Esta propuesta ha sido utilizada en la mayor parte de los artículos científicos escritos en México, en ellos se hace referencia al clima para la descripción de sus áreas de estudio (Sánchez & Garduño, 2008). El éxito de dicha propuesta recae en que los principales insumos, a primera vista, caen en el uso de datos meteorológicos de precipitación y temperatura (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). A escala puntual, con datos de la estación meteorológica de un área determinada, la categorización puede llevarse con una aproximación aceptable. No obstante, y como se mencionó en la introducción del presente escrito, las principales modificaciones que se realizaron a este sistema clasificatorios, estuvieron estrechamente relacionadas con el tipo

de vegetación existente en áreas particulares. Por lo tanto, su aplicación depende, en muchas ocasiones, del conocimiento experto que se tenga de la vegetación (García, 2004; Sánchez & Garduño, 2008). Adicionalmente, dicha propuesta está diseñada para abordar el tema a escalas geográficas pequeñas, dado que las transiciones entre categorías están pensadas para transiciones latitudinales y no altitudinales (García, 2004).

En este sentido, la propuesta climática utilizada en la presente tesis, tiene elementos que la hacen atractiva para su uso en México, y que, a grandes rasgos, se mencionan a continuación:

- a) Esta clasificación climática toma en cuenta solo valores físicos, de periodos específicos para la realización del cálculo de índices y con ello obtener las diferentes categorías que integran a la propuesta. La vegetación, en sí misma, no forma parte de su construcción y solo es evidente en la validación de la presente propuesta.
- b) El modelo bioclimático puede ser estudiado a diferentes escalas espaciales, permitiendo el conocimiento a micro, meso y macroescala.
- c) La metodología expresada en el modelo permite que esta sea replicable, dado que los datos son de fácil acceso y no contempla particularidades únicas de cada región para definir un clima.

La tecnología con la que se cuenta actualmente, hace factible el manejo de datos para el cálculo de índices, y convierte su procesamiento en más rápido y eficaz. El uso de hardware, con gran capacidad de procesamiento, y de software que permiten el ordenamiento, análisis y modelamiento espacial de los mismos, hacen posible la generación de cartografía que muestra la ocurrencia del fenómeno sobre la superficie terrestre.

Así, la presente tesis evaluó la capacidad del enfoque bioclimático para representar la complejidad de un territorio sumamente complejo geofísica y biológicamente hablando. La

acertada y verificada aproximación climática realizada para el Estado permitió la predicción de tipos de cubiertas de vegetación en zonas donde actualmente hay actividades preponderantemente antrópicas, Asimismo, esta propuesta ayudó a identificar, con un alto grado de correlación estadística, comunidades arbóreas en Michoacán, logrando con ello crear una cartografía de la vegetación. Es así que, el objetivo general planteado para la presente disertación se cumplió.

Es, sin embargo, preciso comentar algunos de los inconvenientes que se detectaron durante la investigación. La falta de información climática, particularmente provocada por la insuficiencia y mala calidad de los datos de las estaciones meteorológicas, tuvo un primer impacto en el no poder hacer una aproximación más detallada y precisa del estudio. El Atlas Climático Digital de México (ACDM), creado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, realizó la interpolación de datos climático para todo México, cubriendo así los espacios sin información. No obstante esto, hay un error *per se* de la información elaborada por el ACDM, la cual hacen referencia los propios autores: los datos tanto a nivel del mar como en zonas con gran altitud tienden a tener un mayor error. Lo anterior es provocado por la ausencia de estaciones meteorológicas en estas áreas, por lo que los datos mostrados de estas áreas son reflejos de una proyección más estadística. Otro punto a destacar es la capa del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie V de INEGI, la cual fue creada mediante el uso de percepción remota. Dado lo anterior, la extensión de algunos polígonos tienden a subestimarse o sobrestimarse, lo que trae consigo el cometer errores en la predicción de cubiertas de vegetación al presentarse falsas combinaciones con los elementos del paisaje. Por último, es pertinente mencionar que los datos de vegetación colectados durante los últimos 15 años fueron un importante insumo para identificar comunidades arbóreas a escala regional. Lo anterior implica que el querer aplicar la información mostrada en la presente tesis a escalas más finas hará, muy probablemente, que no coincida con la realidad. Así, se hace necesario incrementar el trabajo de campo, coleccionar más información botánica y aplicar el análisis por áreas de estudio. La anterior condición es obligado por lo geobiodiverso que es el Estado.

Finalmente, los resultados de la presente tesis pueden funcionar como un excelente insumo para cambiar o replantear políticas, principalmente, del sector primario, además de aquellas que tienen que ver con el aprovechamiento de los recursos naturales. Así, por ejemplo, la ampliación o reducción de las áreas de cultivo producto del cambio climático, o la identificación de la pérdida de elementos de vegetación nativa y aparición de individuos arvenses producto de eventos naturales o de actividades antrópicas, podrán ser identificadas mediante el uso de los resultados de presente estudio.

Literatura citada

Cabrera, A., González, J., & Ayala, J. (2005). Los suelos. In L. Villaseñor (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. (1st ed., pp. 29–31). Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

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

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5th ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo nacional. Escala 1:1'000,000. Serie I. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/fisiografia/>

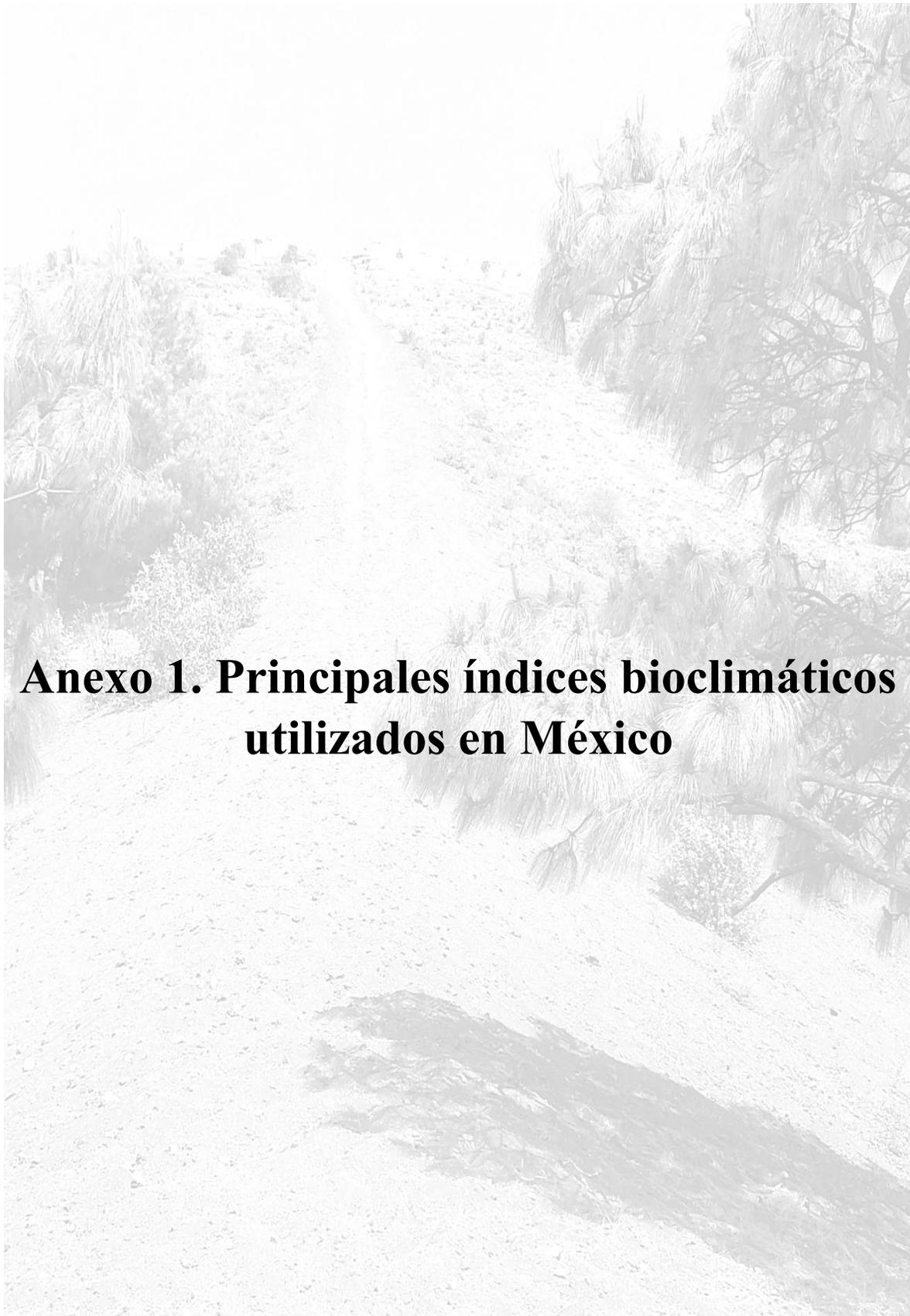
INIFAP. (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Michoacán (periodo 1961 - 2003)*. (INIFAP, Ed.). México, D.F.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg110001>

Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., Ontiveros, R., & López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad Y Ciencia*, 28(1), 1–14. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v28n1/v28n1a1.pdf>

Sánchez, N., & Garduño, R. (2008). Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. *ContactoS*, (68), 5–10. Retrieved from <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/index.php/Numeros-anteriores.html>

Villaseñor, L. (Ed.). (2005). *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de caso*. Morelia, Michoacán: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/EE_MICHOACAN_2005.pdf



Anexo 1. Principales índices bioclimáticos utilizados en México

La Bioclimatología es un enfoque emergente que tiene como propósito principal el de entender, representar y cartografiar la estrecha relación que existe entre el clima y la vegetación (Gopar-Merino, Velázquez, & Giménez A, 2015; Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011). Esta propuesta de clasificación climática reconoce, en primera instancia, cinco “macrobioclimas”, siendo estas las unidades tipológicas de mayor rango en la clasificación. La delimitación de cada una de la anteriores esta dada por valores latitudinales, climáticos y por tipos de vegetación. A su vez, cada macrobioclima presenta unidades subordinadas llamadas “bioclimas”, las cuales están constituidas por características geofísicas y tipos de vegetación propias. Para México, el macrobioclima predominante es el Tropical con cinco bioclimas.

Tabla 1. Macrobioclimas y bioclimas identificados para el planeta. El macrobioclima preponderante para México es el Tropical, el cual está integrado por cinco unidades bioclimáticas (Tabla tomada de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_01.htm).

<i>Macrobioclimas</i>	<i>Bioclimas</i>
Tropical	Tropical pluvial
	Tropical pluviestacional
	Tropical xérico
	Tropical desértico
	Tropical hiperdesértico
Mediterráneo	Mediterráneo pluviestacional oceánico
	Mediterráneo pluviestacional continental
	Mediterráneo xérico oceánico
	Mediterráneo xérico continental
	Mediterráneo desértico oceánico
	Mediterráneo desértico continental
	Mediterráneo hiperdesértico oceánico
	Mediterráneo hiperdesértico continental
Templado	Templado hiperoceánico
	Templado oceánico
	Templado continental
	Templado xérico
Boreal	Boreal hiperoceánico
	Boreal oceánico
	Boreal subcontinental
	Boreal continental
	Boreal hipercontinental
Polar	Boreal xérico
	Polar hiperoceánico
	Polar oceánico
	Polar continental
	Polar xérico
	Polar pergélico

El macrobioclima Tropical se define, primordialmente, por aquellas regiones de la Tierra que se encuentren en las cinturas latitudinales de entre 0 a 23° Norte y Sur. Asimismo, entre otras características más particulares, se ubican las áreas ubicadas latitudinalmente entre los paralelos de 23° a 35° Norte y Sur, donde las precipitaciones del semestre más cálido del año son mayores al del semestre más frío del año o que las precipitaciones del cuatrimestre más cálido del año son mayores al del cuatrimestre siguiente al más cálido y menores al del cuatrimestre anterior al más cálido del año (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

Los bioclimas, por su parte, están definidos por índices temoclimáticos (de temperatura [It y Tp]) y ombroclimáticos (de precipitación [Io]). La identificación se realiza con forme a la siguiente clave:

Tabla 2. Clave para identificar bioclimas tropicales (Tabla tomada de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_01.htm).

Clave para la identificación de Bioclimas Tropicales		
1	Índice ombrotérmico anual $I_o > 3.6$	2
	Índice ombrotérmico anual $I_o \leq 3.6$	3
2	Índice ombrotérmico bimestral más seco del trimestre más seco del año $I_{od2} < 2.5$	Tropical pluviestacional
	Índice ombrotérmico bimestral más seco del trimestre más seco del año $I_{od2} \geq 2.5$	5
3	Índice ombrotérmico anual $I_o < 0.2$	Tropical hiperdesértico
	Índice ombrotérmico anual $I_o \geq 0.2$	4
4	Índice ombrotérmico anual $I_o \leq 1.0$	Tropical desértico
	Índice ombrotérmico anual $I_o > 1.0$	Tropical xérico
5	$T_p > 950$	Tropical pluvial
	$T_p < 950$ (oro-criorotropical)	6
6	Al menos tres meses consecutivos el año P_i (precipitación media mensual) < 10 mm	Tropical pluviestacional
	Sin tres meses consecutivos el año P_i (precipitación media mensual) < 10 mm	Tropical pluvial

Donde:

- **Io** = Es el cociente entre la suma de la precipitación media en milímetros de los meses cuya temperatura media es superior a 0°C (Pp) y la suma de las temperaturas medias mensuales superiores a 0°C en décimas de grado (Tp) (del Río, 2005).

$$Io = (Pp / Tp)10$$

ó

- **Io** = Es el cociente entre la precipitación media anual (P) y la temperatura media anual (T) multiplicada por 12 (Navarro, 1997).

$$Io = P / (12 \times T)$$

Iod2 = Índice ombrotérmico del bimestre más seco del trimestre más seco del año (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

$$Iod2 = (Pps2 / Tps2)10$$

Tp = Es la suma de las temperaturas medias mensuales superiores a 0°C en décimas de grado (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

Pi = Precipitación media mensual (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

Los tipos bioclimáticos son cada condición climática que acontecen en la superficie terrestre y estan estrechamente relacionados con la altitudinal o latitud de las área de interes. La delimitación de estos últimos está dado por componentes termoclimáticos (definidos principalmente por el índice de termicidad [It]) y ombroclimáticos (definidos principalmente por el índice de precipitación [Io]).

Los termotipos se identifican de acuerdo a la siguiente clave (Rivas-Martínez, Rivas, &

Penas, 2011):

Tabla 3. Clave para identificar termotipos tropicales (Tabla tomada de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_01.htm).

Termotipos	It
Infratropical inferior	> 800
Infratropical superior	710-800
Termotropical inferior	600-710
Termotropical superior	490-600
Mesotropical inferior	405-490
Mesotropical superior	320-405
Supratropical inferior	240-320
Supratropical superior	160-240
Orotropical inferior	(120)-160
Orotropical superior	-
Criorotropical inferior	-
Criorotropical superior	-
Gélido	-

Donde:

- It = El índice de termicidad se define como la suma de la temperatura media anual (T), temperatura media de las mínimas del mes más frío (m) y temperatura media de las máximas del mes más frío (M), multiplicado por 10 para pasarlo a decima de grados (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

$$It = (T+M+m)10$$

Los ombrotipos se identifican de acuerdo a la siguiente clave (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011):

Tabla 4. Clave para identificar ombrotipos (Tabla tomada de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_01.htm).

Ombrotipos	Io
1a. Ultrahiperárido inferior	0.0-0.1
1a. Ultrahiperárido superior	0.1-0.2
2a. Hiperárido inferior	0.2-0.3
2b. Hiperárido superior	0.3-0.4
3a. Árido inferior	0.4-0.7
3b. Árido superior	0.7-1.0
4a. Semiárido inferior	1.0-1.5

4b. Semiárido superior	1.5-2.0
5a. Seco inferior	2.0-2.8
5b. Seco superior	2.8-3.6
6a. Subhúmedo inferior	3.6-4.8
6b. Subhúmedo superior	4.8-6.0
7a. Húmedo inferior	6.0-9.0
7b. Húmedo superior	9.0-12.0
8a. Hiperhúmedo inferior	12.0-18.0
8b. Hiperhúmedo superior	18.0-24.0
9. Ultrahiperhúmedo	> 24.0

El isobioclima es la expresión resultante de la unión de un macrobioclima, un bioclima, un termotipo y un ombrotipo (Rivas-Martínez, Rivas, & Penas, 2011).

Isobioclima = Macrobioclima + bioclima + termotipo + ombrotipo

Literatura citada

- del Río, S. (2005). El cambio climático y su influencia en la vegetación de Castilla y León (España). *Itinera Geobotanica*, (16), 534.
- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & Giménez A, J. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 5(11). Retrieved from <http://www.esajournals.org/loi/ecsp>
- Navarro, G. (1997). Contribución a la clasificación ecológica y florística de los bosques de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología Y Conservación Ambiental*, (2), 3 – 37. Retrieved from http://www.cedsip.org/PDFs/2_1navarro.pdf
- Rivas-Martínez, S., Rivas, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, (1), 1–634. <http://doi.org/10.5616/gg11000>