



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

*VARIACIÓN ALTITUDINAL DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN EL
MUNICIPIO DE ZITÁCUARO, MICHOACÁN: IMPLICACIONES PARA LOS
USOS DEL SUELO AGRÍCOLAS.*

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ERNESTO FERNANDO HERNÁNDEZ AGUILAR

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA ISABEL RAMÍREZ RAMÍREZ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DE 2018



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.

A mi madre, por todo el amor, la confianza y el apoyo en la distancia.

Por su fortaleza.

Debo tiempo a tu lado, pero el amor siempre lo has tenido.

A Vane mi compañera de viaje en esta vida, por su amor y comprensión.

Por los momentos buenos y malos.

Por encontrar en ella mi complemento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al posgrado en Geografía, a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) por haberme acogido durante estos dos años, y por haberme brindado la oportunidad de convivir y compartir espacios de trabajos con excelentes académicos. Así como a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, por la oportunidad que me brindaron para realizar mi estancia académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante dos años para el desarrollo de mis estudios de maestría.

Agradezco los proyectos que apoyaron diversas etapas del desarrollo de esta investigación: PAPIIT-UNAM IN301215, “La política forestal de Michoacán: historia, conflictos e impacto en el territorio”; SEMARNAT-2015-1-263006, “Prospección territorial ante escenarios de cambio climático en cuencas de alta vulnerabilidad: base para el manejo de información y la integración intersectorial”; e IAI CRN-3095 (NSF grant GEO-1128040), “Bridging Ecosystem Services and Territorial Planning” (BEST-P).

A Alternare A.C. por las facilidades para la descarga de los datos de la estación meteorológica ubicada en sus instalaciones y por facilitarnos contactos para el trabajo de campo.

A la Dra. Ma. Isabel Ramírez por su apoyo, colaboración, paciencia y entusiasmo que me brindo desde el comienzo de este proyecto, así como por la confianza depositada en mí para realizar dicho trabajo. A la Dra. Adriana Carolina Díaz por sus recomendaciones y observaciones, así como por sus valiosos consejos para poder concluir mi investigación.

A mis sínodos, Dra. Leticia Gómez, al Dr. Oscar Frausto y al Dr. Alberto Gómez-Tagle por sus valiosas aportaciones y recomendaciones a este trabajo, así como por su gran disposición y el tiempo dedicado a lectura de mi tesis.

Al Dr. José Paruelo y al Dr. Pablo Cipriotti por su apoyo durante mi estancia en Buenos Aires, así como por sus valiosos consejos y aportaciones.

A Alexander Quevedo, José Luis Caballero y Jaime Loya por el apoyo que me brindaron en la realización de los modelos climáticos. Así como a mis compañeros de generación por hacer más ameno este camino y por los momentos compartidos dentro y fuera del aula.

Al grupo de trabajo “Paisaje y Territorio en Áreas Protegidas” por escuchar y orientarme mediante la crítica constructiva en los avances que se iban teniendo del proyecto.

Resumen

La competencia por el uso del suelo se define como un concurso entre diferentes funciones que puede asignarse a una determinada porción del terreno. Uno de los factores condicionantes de las posibles funciones es el clima, por su estrecha relación con el desarrollo de la vegetación. El clima es un factor de riesgo para ciertas actividades, pero también un recurso que debe ser valorado en términos cuantitativos y cualitativos.

En este trabajo determinamos la correspondencia entre usos agrícolas del suelo y su aptitud climática en Zitácuaro, en el oriente de Michoacán. Parte de este municipio conforma la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM).

Inventariamos parcelas por tipo de cultivo presentes en 2016 por fotointerpretación escala 1:5000 y trabajo de verificación en campo. Con ayuda de bibliografía especializada identificamos los requerimientos climáticos de cada cultivo encontrado en el municipio. Con regresiones multivariadas y un Modelo Digital de Elevación (MDE) obtuvimos las variaciones mensuales de variables meteorológicas en relación al gradiente altitudinal y se generaron modelos de distribución óptima de los cultivos mediante lógica difusa (Fuzzy).

La superficie agrícola del municipio (38%) supera la superficie forestal (36%), incluso en la porción que corresponde a la RBMM el 12% es uso agrícola. En ambos casos destaca la expansión de cultivos frutícolas de alta rentabilidad (aguacate, zarzamora o guayaba), que se expanden incluso hacia sitios con condiciones climáticas que no son adecuadas para su óptima producción.

Considerando el clima, el suelo y el relieve como factores limitantes, de las 17,256 ha que suma la superficie de parcelas con los diferentes cultivos y plantaciones frutícolas, el 27% se encuentran en zonas aptas para su desarrollo, 65% en zonas moderadamente aptas, y 8% en zonas no aptas. Considerar la zonificación climática para decidir el uso del suelo beneficiaría tanto a la producción de alimentos (cultivos que se adapten mejor a las condiciones ambientales y reducción de pérdidas por fenómenos climáticos) como a la conservación de la biodiversidad.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 4 |
| Índice de figuras | 7 |
| Índice de tablas | 8 |
| Siglas, acrónimos y abreviaturas | 9 |
| Capítulo 1: Introducción | 10 |
| 1.1. Antecedentes | 10 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 14 |
| 1.3. Justificación | 16 |
| 1.4. Objetivo general..... | 17 |
| 1.5. Objetivos particulares..... | 17 |
| Capítulo 2: Marco teórico de referencia | 18 |
| 2.1. La competencia por el uso del suelo. | 18 |
| 2.2. La variación altitudinal y su efecto en las variables meteorológicas clave para el desarrollo de la agricultura..... | 19 |
| 2.3. Implicaciones del clima y el suelo en el uso agrícola del suelo. | 22 |
| 2.3.1. Clima..... | 22 |
| 2.3.2. El suelo..... | 24 |
| 2.4. Modelos de aptitud climática de los usos del suelo agrícolas. | 25 |
| 2.4.1. Modelo de lógica difusa (Fuzzy)..... | 26 |
| Capítulo 3: Métodos | 28 |
| 3.1. Caracterización geográfica del área de estudio..... | 28 |
| 3.1.1. Ubicación geográfica | 28 |
| 3.1.2. Relieve y clima..... | 29 |
| 3.1.3. Edafología..... | 31 |
| 3.1.4. Uso de suelo y vegetación..... | 32 |
| 3.1.5. Componente socioeconómico | 32 |
| 3.2. Inventario de usos agrícolas e identificación de condiciones climáticas idóneas. | 33 |
| 3.2.1. Materiales..... | 33 |
| 3.2.2. Inventario de usos de suelo agrícola | 34 |
| 3.2.3. Verificación en campo | 35 |
| 3.2.4. Encuestas a agricultores | 35 |
| 3.2.5. Condiciones climáticas idóneas para el desarrollo de los cultivos..... | 36 |
| 3.3. Modelos de variación altitudinal mensual..... | 38 |
| 3.3.1. Materiales..... | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2. Obtención de datos climáticos | 38 |
| 3.3.3. Corrección del Tiempo Universal Coordinado | 39 |
| 3.3.4. Ubicación y periodo del registro de datos de las estaciones | 39 |
| 3.3.5. Normalización de la información..... | 41 |
| 3.3.6. Modelación de series de datos en R..... | 42 |
| 3.3.7. Gradiente altitudinal mensual de la temperatura mínima y máxima..... | 43 |
| 3.3.8. Gradiente altitudinal mensual de precipitación..... | 44 |
| 3.4. Modelos de distribución del uso potencial del suelo..... | 44 |
| 3.4.1. Insumos cartográficos digitales..... | 44 |
| 3.4.2. Modelo de Lógica Difusa (Fuzzy) | 45 |
| Capítulo 4: Resultados | 51 |
| 4.1. Inventario de los usos agrícolas del suelo | 51 |
| 4.2. Modelos de variación altitudinal de las variables meteorológicas | 52 |
| 4.2.1. Regresiones multivariadas de la temperatura (mínima y máxima) y precipitación | 52 |
| 4.2.2. Gradiente altitudinal mensual de la temperatura..... | 58 |
| 4.2.3. Gradiente altitudinal mensual de la precipitación | 58 |
| 4.2.4. Caracterización climática anual | 59 |
| 4.3. Modelos de aptitud de los usos agrícolas del suelo..... | 60 |
| Capítulo 5: Discusión | 68 |
| Referencias..... | 76 |
| Anexos | 85 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Áreas Naturales Protegidas del mundo hasta el 2014..... | 11 |
| Figura 2. Expansión del cultivo de aguacate entre 1974 al 2007 en el estado de Michoacán..... | 13 |
| Figura 3. La distribución potencial de la vegetación en la Sierra de Anganguero dentro de la RBMM. | 15 |
| Figura 4. Diferencia entre esquemas de interpolación: con (enero) y sin (julio) información de viento. | 21 |
| Figura 5. Diferencia entre la interpolación de datos de temperatura empleando Kriging (izquierda) y la interpolación considerando el gradiente altitudinal (derecha). | 22 |
| Figura 6. Ejemplo de la curva de Gauss con los umbrales de precipitación. Elaboración propia..... | 27 |
| Figura 7. Ubicación geográfica del municipio de Zitácuaro, Michoacán y, porción de la RBMM que le corresponde..... | 29 |
| Figura 8. Tipos de clima dentro del municipio de Zitácuaro, Michoacán..... | 30 |
| Figura 9. Tipos de suelo en el municipio de Zitácuaro, Michoacán.. | 31 |
| Figura 10. Uso de suelo y vegetación en el municipio de Zitácuaro, Michoacán. | 32 |
| Figura 11. Composición y estructura de las parcelas de los cultivos en campo (fotos tomadas en campo) y en imágenes de satélite (Google Earth). | 34 |
| Figura 12. Distribución de los puntos de verificación en campo..... | 35 |
| Figura 13. Zonas horarias en el mundo..... | 39 |
| Figura 14. Ubicación de las estaciones meteorológicas..... | 40 |
| Figura 15. Periodo de registro de las series de las estaciones meteorológicas consideradas..... | 40 |
| Figura 16. Mapas temáticos del municipio de Zitácuaro, Mich, empleados en el modelo de distribución..... | 45 |
| Figura 17. Curva de Gauss con los criterios de temperatura..... | 49 |
| Figura 18. Diagrama de flujo para generar el mapa de aptitud..... | 50 |
| Figura 19. Usos del suelo agrícolas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán..... | 52 |
| Figura 20. Modelo de temperatura máxima sin colinealidad entre sus variables..... | 53 |
| Figura 21. Modelo de temperatura mínima sin colinealidad entre sus variables..... | 54 |
| Figura 22. Modelo de precipitación sin colinealidad entre sus variables..... | 55 |
| Figura 23. Temperatura mínima y máxima promedio anual..... | 60 |
| Figura 24. Precipitación promedio anual..... | 60 |
| Figura 25. Aptitud para el cultivo de Aguacate a las condiciones climáticas..... | 62 |
| Figura 26. Aptitud para el cultivo de Maíz a las condiciones climáticas..... | 62 |
| Figura 27. Aptitud para el cultivo de Guayaba a las condiciones climáticas..... | 63 |
| Figura 28. Aptitud para el cultivo de Zorzamora a las condiciones climáticas..... | 63 |
| Figura 29. Aptitud para el cultivo de Durazno a las condiciones climáticas..... | 64 |
| Figura 30. Aptitud para el cultivo de Trigo a las condiciones climáticas..... | 64 |
| Figura 31. Aptitud para el cultivo de Maguey a las condiciones climáticas..... | 65 |
| Figura 32. Aptitud para el cultivo de Calabaza a las condiciones climáticas..... | 65 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Descripción de los umbrales térmicos..... | 23 |
| Tabla 2. Ejemplos de umbrales térmicos para el desarrollo de diferentes especies. | 23 |
| Tabla 3. Precipitación en milímetros adecuada para el desarrollo de diferentes especies. | 24 |
| Tabla 4. Trabajos sobre aptitud agroclimática y sus variables empleadas | 25 |
| Tabla 5. Municipios que conforman la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca..... | 28 |
| Tabla 6. Características de los climas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán. | 30 |
| Tabla 7. Características de los tipos de suelo en el municipio de Zitácuaro, Michoacán..... | 31 |
| Tabla 8. Aumento de la superficie sembrada por cultivos en el municipio de Zitácuaro..... | 33 |
| Tabla 9. Patrones en la estructura de las parcelas para la identificación de los usos agrícolas | 34 |
| Tabla 10. Ubicación y número de las encuestas realizadas por uso agrícola en el área de estudio..... | 36 |
| Tabla 11. Condiciones climáticas idóneas anuales para el desarrollo de los cultivos. | 37 |
| Tabla 12. Estaciones meteorológicas y su descripción de registro de datos | 38 |
| Tabla 13. Descripción de las estaciones meteorológicas | 38 |
| Tabla 14. Tabulación de los datos de la estación y promedio normalizado. | 41 |
| Tabla 15. Atributos y su descripción de la base de datos..... | 42 |
| Tabla 16. Valores de aptitud por cada variable para cada cultivo..... | 46 |
| Tabla 17. Reclasificación de valores de aptitud climática | 50 |
| Tabla 18. Superficie aproximada en hectáreas destinada a los diferentes usos agrícolas | 51 |
| Tabla 19. Calendario de los usos del suelo agrícolas..... | 51 |
| Tabla 20. Valores de significancia para el coeficiente de determinación. | 56 |
| Tabla 21. Promedio normalizado de la temperatura mínima mensual en cada estación meteorológica. | 56 |
| Tabla 22. Promedio normalizado de la temperatura máxima mensual en cada estación meteorológica. | 57 |
| Tabla 23. Promedio normalizado de la precipitación acumulada mensual en cada estación meteorológica.... | 57 |
| Tabla 24. Correlación mensual entre la temperatura y la altitud..... | 58 |
| Tabla 25. Correlación mensual entre la precipitación y la altitud..... | 59 |
| Tabla 26. Valores de aptitud climática de los cultivos dentro del municipio de Zitácuaro..... | 61 |
| Tabla 27. Distribución de la superficie en hectáreas de cada cultivo en relación a su aptitud ambiental. | 66 |

Siglas, acrónimos y abreviaturas

| | |
|----------------|--|
| ANP | Área Natural Protegida |
| °C | Grados Celsius |
| CGSMN | Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional |
| CIGA | Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua |
| DDR | Distrito de Desarrollo Rural |
| EMAs | Estaciones Meteorológicas Automáticas |
| GPS | Sistema de Posicionamiento Global |
| ha | Hectáreas |
| IDW | Distancia Inversa Ponderada (Método de interpolación) |
| IUCN | Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza |
| MDE | Modelo Digital de Elevación |
| mm | Milímetros |
| msnm | Metros Sobre el Nivel del Mar |
| ONG | Organizaciones no gubernamentales |
| r ² | Coficiente de determinación |
| RBMM | Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca |
| SAGARPA | Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación |
| SIAP | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera |
| SMN | Servicio Meteorológico Nacional |
| UTC | Tiempo Universal Coordinado |
| UTM | Proyección Universal Transversal de Mercator |
| WWF | Fondo Mundial para la Naturaleza |

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

La competencia por el uso del suelo se define “como un concurso entre diferentes funciones que puede asignarse a una determinada porción de suelo” (Haberl *et al.*, 2014: 37). Tal es el caso del establecimiento de áreas destinadas para la producción (esencialmente la agricultura y la silvicultura) frente a las de conservación (biodiversidad, almacenamiento de carbono, protección de cuencas, control de degradación de suelo, entre otros) (Haberl *et al.*, 2014).

Los usos del suelo como son la agricultura, la urbanización, el pastoreo y el aprovechamiento de los bosques producen alteraciones en el componente biofísico del paisaje. Un mal manejo de esas actividades puede afectar la capacidad de los sistemas biológicos para soportar la vida y reducir la capacidad que estos tienen para satisfacer muchas de las necesidades humanas (Lambin *et al.*, 2001; Guhl, 2004).

El clima, por su estrecha relación con el desarrollo de la vegetación, influye en la distribución de los usos del suelo (Rodríguez *et al.*, 2013). Tal es el caso en la región del Chaco de Argentina, la cual no se consideraba adecuada para el establecimiento de cultivos, sin embargo las cepas de la soya al ser tolerantes a la sequía la tornó ideal (Zak *et al.*, 2008). En Australia, el conocimiento climático ha influido para el desarrollo de una política de sequía, la cual se centra en mejorar la autosuficiencia de los agricultores para manejar este tipo de riesgo climático debido a que las variaciones estacionales del clima en relación a la normal producen pérdidas de cultivos (Granados *et al.*, 2004; Meinke *et al.*, 2006).

El clima es un factor que incide en el desarrollo de la vegetación, por lo tanto, debe ser considerado en términos cuantitativos y cualitativos para conocer qué tan aptos son los cultivos bajo ciertas condiciones climáticas. La delimitación de zonas adecuadas para el establecimiento de los cultivos en función del clima en áreas donde prevalece la agricultura de temporal y que cuentan con pocos recursos tecnológicos, aporta estrategias de adaptación beneficiando a los agricultores al poder seleccionar los cultivos favorables para su desarrollo, como también, apoyar en la toma de decisiones para la conservación del ambiente (Díaz *et al.*, 2000; Sierra y Pérez, 2006; Velázquez *et al.*, 2012).

El cambio de cubierta forestal a uso agrícola es uno de los procesos con mayor ocurrencia a nivel mundial. Aproximadamente el 30 % de la superficie terrestre está cubierta por bosques, entre 1990 y 2005 alrededor de 64 millones de hectáreas fueron deforestadas en Latinoamérica y el Caribe (sobre todo en países con altos índices de pobreza), en su mayoría con la finalidad de ampliar espacios para la agricultura (FAO, 2007). En muchos de esos casos no se consideró que los cultivos presentan una mayor susceptibilidad a las condiciones climáticas en comparación con la vegetación natural, o el uso de aquellos mejor adaptados a las condiciones locales o cultivos de especies nativas de la región (Velasco y Pimentel, 2010).

La formación de Áreas Naturales Protegidas (ANP) ha ayudado a disminuir la deforestación, desempeñado un papel fundamental para la conservación de los ecosistemas (Manzo *et al.*, 2014). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés) muestra que existen 209,429 ANP, que representan cerca de 32,868,673 km² lo que equivale al 14% de la superficie terrestre (Deguignet *et al.*, 2014) (figura 1).

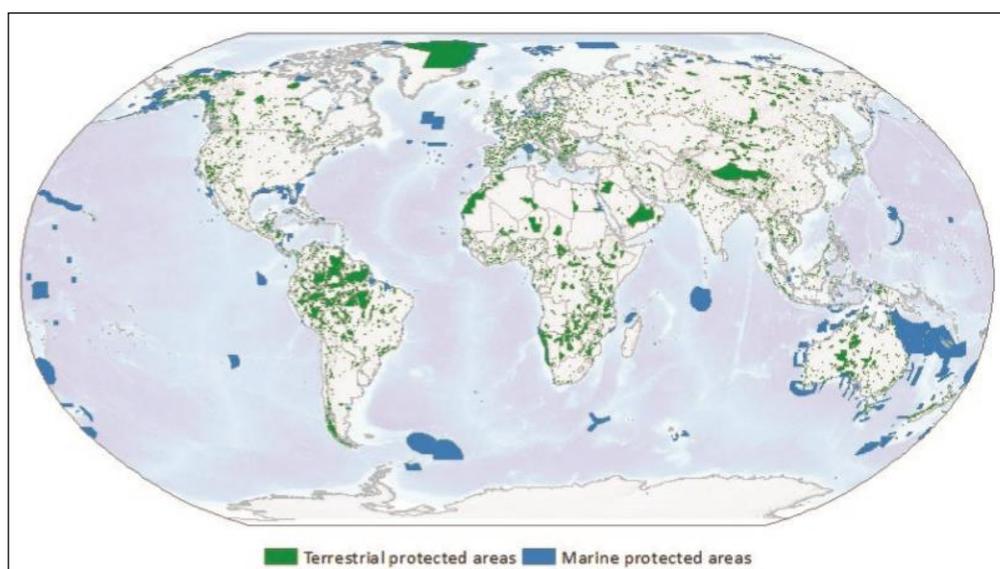


Figura 1. Áreas Naturales Protegidas del mundo hasta el 2014.

Fuente: (IUCN y UNEP-WCMC, 2014).

En México, entre 1976 y 2000, más de 2 millones de ha de bosque templado fueron deforestados con la finalidad de ampliar la frontera agrícola, lo que equivale al 16% de los bosques templados del país (Velázquez *et al.*, 2002; Mas *et al.*, 2004). En contra parte, entre

1993 a 2001, el suelo total dedicado a la agricultura aumentó 2.57 millones de hectáreas con una tasa anual de 1.16% atribuido a la demanda por el incremento poblacional (Ortiz *et al.*, 2002). Esto puede favorecer la degradación del suelo dependiendo de la temporada de siembra y cosecha del cultivo por el tiempo que se deja descubierto el suelo al terminar de cosechar (Ortiz *et al.*, 2002).

La erosión genera pérdida de nutrientes y reduce la disponibilidad de agua repercutiendo en el desarrollo del cultivo y se traduce en una baja productividad dentro de la parcela. Mientras que fuera de la parcela ocasiona problemas de sedimentación, incidiendo en la pérdida de biodiversidad y la modificación del régimen hidrológico de las cuencas (Pagiola, 1999; De Graaff, 2000; Cotler *et al.*, 2007).

Es conveniente que tanto los bosques como la actividad agrícola puedan coexistir, una de las razones es que los bosques generan ciertas condiciones que favorecen a las actividades agrícolas como: la estacionalidad de la temporada de lluvias (fundamental para el desarrollo de los cultivos de temporal), el mantenimiento del caudal en temporada de secas, la calidad del agua y el control de la erosión y sedimentación del suelo. Estos beneficios o servicios ecosistémicos de los bosques pueden condicionar el desarrollo de los cultivos (Bishop y Landell, 2006).

Estudios más recientes han demostrado que la deforestación en México ha disminuido al pasar de 354,000 ha/año en el 2005 a 155,000 ha/año en el 2010. Pero sigue existiendo, y sus principales factores son la tala ilegal y la conversión a zonas de agricultura (FAO, 2015).

Se estima que puede presentarse la ocurrencia de anomalías climáticas que afecten directamente a los cultivos. Estudios prospectivos de cambio climático en México pronostican que la temperatura promedio anual se incrementará en 1.4°C para el año 2030, 2.2°C para el año 2060 y 3.6°C para el año 2090. A su vez la precipitación anual decrecerá en 5.6% para el año 2030, 5.9% para el año 2060 y 7.8% para el año 2090. Todo ello afectará directamente la distribución actual de la vegetación (Sáenz *et al.*, 2012).

En el estado de Michoacán, el 29% (1,790,179 ha) del total de la superficie con vocación forestal es dedicada a otros usos. Entre 1993 y 2000, se perdieron 102,538 ha de bosque, equivalentes a 14,648 ha anuales, principalmente por el cambio de uso de suelo (Tapia y

Sáenz, 2012). Entre el periodo de 2004 al 2007 la tasa de deforestación anual en el estado fue de 0.16% y para el periodo entre 2007 al 2015 ha disminuido a 0.09%, pero existen zonas donde los tipos de vegetación como los bosques de pino y pino-encino han sido sustituidos por cultivos agrícolas (Mas *et al.*, 2017).

En Michoacán una de las principales causas del cambio de uso del suelo de cubierta forestal a uso agrícola es la alta rentabilidad de plantaciones frutícolas como el Aguacate, la Zarcamora y la Guayaba. Michoacán ocupa el primer lugar nacional en la producción de dichos frutos, lo que está ejerciendo presión sobre los recursos forestales ocasionando la degradación y pérdida del suelo fértil al establecerse en zonas con una clara vocación forestal (INEGI, 2014).

El Aguacate es el cultivo más representativo del estado de Michoacán. En un estudio para conocer su distribución y elaborar un diagnóstico de las condiciones territoriales en las que se desarrolla mejor, se encontró que de 13 mil ha en 1974, este cultivo ocupaba poco más de 112 mil ha para el año 2006 (Morales y Cuevas, 2011) (figura 2).

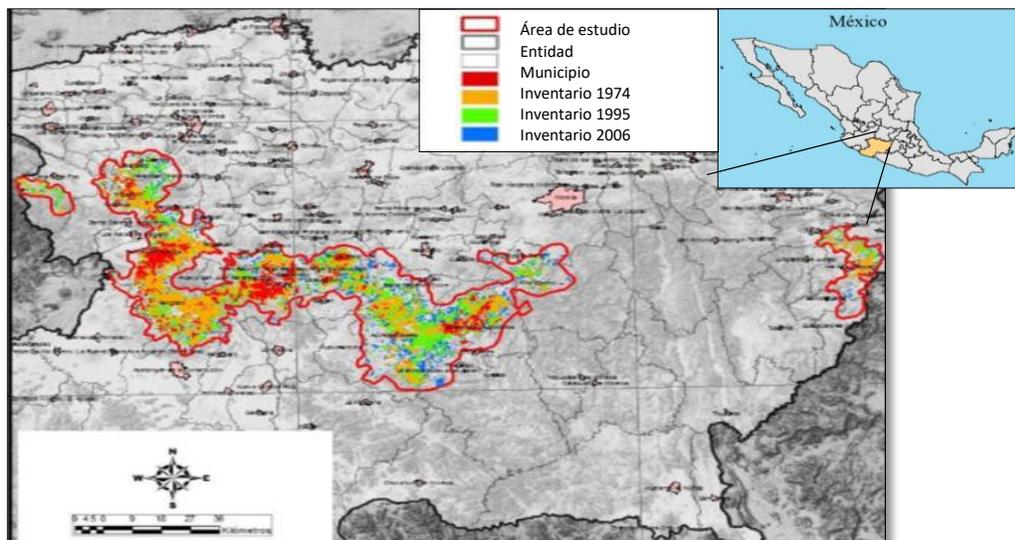


Figura 2. Expansión del cultivo de aguacate entre 1974 al 2007 en el estado de Michoacán.

Fuente: (Morales y Cuevas, 2011)

La expansión de las actividades agrícolas está generando una competencia entre las áreas de agricultura y las áreas con vocación forestal debido a la rentabilidad de los cultivos. Pero

ahora los agricultores se enfrentan a problemas de producción, ya que hay zonas donde las condiciones climáticas no son las adecuadas para el desarrollo del fruto repercutiendo en sus ingresos económicos, por lo que es conveniente considerar las condiciones climáticas que necesitan los cultivos para su desarrollo (Aguirre y Bárcenas, 2005; Bravo *et al.*, 2012).

Para este estudio, nos enfocamos en la parte oriente del estado de Michoacán, concretamente en el municipio de Zitácuaro, debido a que en los últimos años ha incrementado la superficie cultivada de las plantaciones de aguacate, zarzamora y guayaba. Estos cultivos se han expandido principalmente por el cambio del cultivo de maíz y, en segundo, por la conversión de cubierta forestal a dichas plantaciones. Esto toma mayor relevancia cuando las cubiertas forestales forman parte del Área Natural Protegida de la Reserva de la Biosfera Mariposa.

1.2. Planteamiento del problema

El municipio de Zitácuaro, Michoacán, presenta una fuerte conversión de cubierta forestal a uso agrícola, esto se atribuye a la expansión de cultivos frutícolas de alta rentabilidad económica como lo es el aguacate, la zarzamora y la guayaba. El precio de la producción por hectárea es de \$130,000, \$100,000 y \$72,000 pesos respectivamente, y la mayor parte de esta producción se exporta a Estados Unidos (SAGARPA, 2010a, 2010b, 2010c; Ornelas *et al.*, 2016). Tan solo en el año 2000, la superficie con aguacate abarcó 1,132 ha (Anguiano *et al.*, 2006). A nivel estatal el cambio de uso del suelo de forestal a cultivo de aguacate está provocando problemas de erosión hídrica al cambiar la densidad de la vegetación quedando el suelo desnudo, lo cual se agrava por el efecto de la pendiente (Morales y Cuevas, 2011).

El uso agrícola dentro del ANP de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), junto con la tala ilegal y los incendios forestales amenazan la conservación de la biodiversidad de esta reserva (Cantú, 2013). En las 56,259 ha que ocupa la RBMM ha habido zonas y periodos con mayor o menor pérdida y perturbación del bosque, en total entre 1986 y 2012 hubo deforestación de más de 600 ha por cambio de uso del suelo, y perturbación forestal en casi 12,000 ha, en orden de importancia provocadas por tala ilegal e incendios, manejo forestal y eventos naturales (Ramírez *et al.*, 2015).

En la RBMM el suelo andosol es de marcada vocación forestal para vegetación como oyamel, pino y encino, aunado a esto, la presencia de heladas (periodos con temperatura inferior a los 0 °C) son muy frecuentes y aumenta con la elevación. A más de 2,400 msnm las heladas son tan frecuentes que limitan el desarrollo de cultivos (Ramírez, 2001b). Además, con cierta regularidad se presentan también nevadas, tal como ocurrió el 12 de marzo de 2016, cuando la nieve alcanzó en algunas zonas los 35 centímetros de altura y los fuertes vientos derribaron miles de árboles (Brower *et al.*, 2017).

Los cultivos pueden resultar afectados por la distribución de las lluvias dentro del municipio, debido a que no es el mismo patrón climático en todos los años, se presentan precipitaciones tempranas o tardías que afectan el desarrollo de los cultivos produciendo pérdidas de cosechas. Esto es más severo para la agricultura de temporal, al ser la precipitación su principal fuente de abastecimiento de agua (Granados y Longar, 2008).

La temperatura máxima y mínima también inciden en la distribución de la vegetación generando pisos altitudinales con condiciones particulares para cada tipo de vegetación. El territorio de la RBMM es vocación forestal (Giménez *et al.*, 2003; Figura 3).

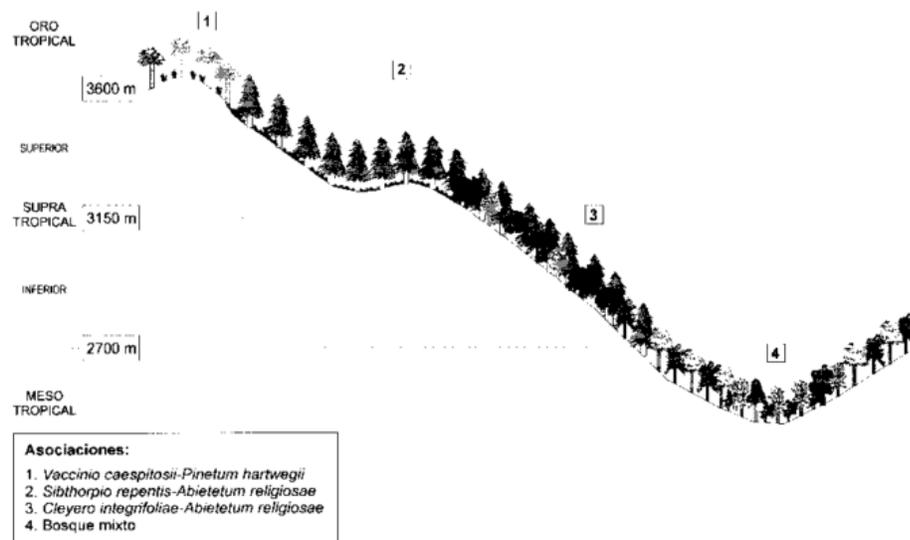


Figura 3. La distribución potencial de la vegetación en la Sierra de Angangueo dentro de la RBMM.

Fuente: Giménez *et al.*, 2003.

Para realizar una zonificación agrícola en función al clima, se pueden elaborar modelos que describan el comportamiento de las condiciones climáticas del lugar y permitan suplir los posibles vacíos o carencia de datos (Vidal, 2005; Molina y Reyes, 2009; Leal *et al.*, 2010).

1.3. Justificación

Zitácuaro cuenta con una superficie de 11,706 ha destinadas a la agricultura, de las cuales 2,920 ha son de riego y 8,786 ha de temporal (SIAP, 2015). El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social clasifica al municipio como zona de atención prioritaria, dado que en la mayor parte del territorio se practica la agricultura de temporal y que el 58% de su población tanto rural como urbana se encuentra en condiciones de pobreza (CONEVAL, 2010).

Para los pequeños agricultores, se dificulta la utilización de recursos tecnológicos para poder hacer frente a las condiciones desfavorables del clima porque apenas comienzan a establecer las plantaciones más rentables (aguacate, zarzamora y guayaba), con lo cual, hasta que cosechen los frutos podrán tener un ingreso monetario que va a variar dependiendo del desarrollo de la planta en relación con la aptitud climática del sitio donde establecieron. Los que ya tienen tiempo trabajando con dichas plantaciones y están en zonas óptimas para el desarrollo de esos cultivos, ya cuentan con recursos económicos por los ingresos que les ha generado la venta de los frutos para invertir en invernaderos o para obtener créditos (SAGARPA, 2010b).

Tanto para los productores de temporal como para los de regadío, el conocimiento de los rasgos climáticos a nivel local se vuelve relevante para reducir pérdidas por fenómenos meteorológicos y costos de operación. Este conocimiento también les permite identificar las áreas con óptimo potencial para el desarrollo de cada actividad agrícola y regular la expansión de la frontera agrícola hacia zonas que no son adecuadas para el establecimiento de cultivos (Díaz *et al.*, 2000) o que son clave para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que el bosque les provee para el buen desarrollo de sus cultivos.

Parte del municipio de Zitácuaro forma parte de la RBMM, la cual fue decretada con la finalidad de proteger los bosques que son el hábitat en donde hiberna y se reproduce la mariposa Monarca. Por ley, en el área núcleo solo se permiten actividades de investigación y ecoturismo, y en la zona de amortiguamiento también manejo forestal controlado sustentable

(DOF, 2000). Por lo tanto, los modelos de usos del suelo deben incluir las restricciones legales de uso para la conservación de la biodiversidad.

1.4. Objetivo general

Determinar la correspondencia de los usos agrícolas del suelo y su aptitud climática en el municipio de Zitácuaro, Michoacán.

1.5. Objetivos particulares

1. Identificar los usos agrícolas del suelo actuales en el municipio Zitácuaro, Michoacán.
2. Realizar la caracterización climática de los diferentes pisos altitudinales relacionados con los diversos usos agrícolas.
3. Generar modelos de la distribución de usos agrícolas adecuados y no adecuados a las condiciones climáticas, considerando también otros factores como suelo, relieve y restricciones de ley establecidas para la conservación.

Capítulo 2: Marco teórico de referencia

2.1. La competencia por el uso del suelo.

A nivel global, las principales categorías por la competencia del suelo se pueden generalizar de la siguiente forma: áreas de conservación, producción y de entorno construido (Haberl *et al.*, 2014).

- *Conservación*: mantenimiento de los servicios ecosistémicos de regulación, entre los cuales destacan, la captura de carbono, protección de cuencas, control de la erosión, entre otros.
- *Producción*: servicios ecosistémicos de provisión como la extracción de madera, los cultivos para alimentación, cultivos para la obtención de biocombustibles, entre otros.
- *Entorno construido*: construcción de asentamientos humanos, infraestructuras superficiales impermeables como carreteras, depósitos de residuos y minería superficial. Estos cambios en la cobertura del suelo son irreversibles o necesitan de grandes inversiones económicas para ser revertidos.

Una de las mayores amenazas actuales para la conservación de la biodiversidad es la expansión e intensificación de la agricultura, ya que ha reducido en más del 50% la extensión de los hábitats naturales (Green *et al.*, 2005).

En Brasil, Malasia e Indonesia el establecimiento de la palma de aceite a costa de la destrucción de selvas tropicales impulsada en gran medida por la expansión de los mercados de biocombustibles en la Unión Europea, están impactando directamente en la conservación de la biodiversidad y los servicios regulatorios de las selvas (Fitzherbert *et al.*, 2008).

De las poblaciones rurales del mundo el 75% depende de la agricultura y la silvicultura, lo cual adquiere relevancia cuando estas áreas se encuentra cerca de hábitats naturales y/o en ANP que se ven amenazadas por la expansión de la agricultura y el pastoreo (Bezaury y Gutiérrez, 2009; Torres *et al.*, 2011).

Sin embargo, no se trata de frenar la expansión de la frontera agrícola sino de regularla, porque la agricultura suministra a las poblaciones humanas de alimentos, materias primas para vestido, medicinas, y otros productos para su bienestar y considerando que la población

mundial ya rebasó la cifra de 9.1 billones de personas, la producción agrícola necesita aumentar conforme a la creciente demanda (Tilman *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2011).

En este sentido, el seleccionar usos del suelo en relación a su aptitud climática es uno de los criterios que puede ayudar en la asignación de la función que mejor se adapte, estableciendo zonas de conservación de la biodiversidad o zonas para la producción agrícola.

2.2. La variación altitudinal y su efecto en las variables meteorológicas clave para el desarrollo de la agricultura.

El clima se define como el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera sobre un lugar determinado. Los elementos que conforman el clima son la temperatura, presión atmosférica, viento, precipitación, humedad y nubosidad. Los rasgos de sus elementos son la variabilidad espacial (muestra las diferencias regionales de los climas en la superficie terrestre) y la variabilidad temporal (fenómenos meteorológicos en periodos limitados como un día, un mes, un año o en intervalos de tiempos más largos) (Fernández, 1996; Ayllón, 2003).

Para realizar una clasificación climática es necesario considerar la escala, debido a que presentan diferentes características que pueden ser agrupados de la siguiente manera (Fernández, 1996):

- *Climas zonales o macroclimas*: rasgos más o menos constantes sobre áreas de extensión que superan los 2,000 kilómetros (km). Caracterizado por la distribución de los principales elementos del clima, en función de la latitud, la naturaleza de la superficie subyacente y la circulación de la atmósfera.
- *Climas regionales o mesoclimas*: su extensión abarca entre 200 y 2,000 km. Son zonas climáticas donde la orografía separa masas de aire, generando diferencias significativas en los valores de algunos elementos climáticos.
- *Climas locales*: conjunto variado y complejo de áreas pequeñas con rasgos similares y dependientes de los climas regionales, porque muestran diferencias significativas como consecuencias de la altitud, orientación, tipo de cubierta vegetal y la proximidad al mar.

- *Microclimas*: espacios que pueden alcanzar un centímetro, cuyos rasgos están determinados por los factores del entorno próximo al suelo como el tipo de materiales.

Existen diversos sistemas de clasificación climática a nivel mundial, uno de los más conocidos es la propuesta por Köppen, la cual utiliza datos de temperatura y precipitación media mensual y anual, definiendo zonas climáticas del mundo a través de la latitud y que fueran coincidentes con la vegetación natural (García, 2004; Velasco y Pimentel, 2010).

En México, por su accidentada topografía se generan condiciones particulares en la distribución de las variables climáticas, lo que llevó a que se realizaran modificaciones a la clasificación de Köppen para una mejor descripción de los climas en el país (García, 2004).

A pesar de que dichas clasificaciones son de gran utilidad para la caracterización climática, para la producción de cultivos el conocimiento de los rasgos climáticos necesitan ser a nivel local, especialmente en la agricultura de temporal, permitiendo seleccionar los cultivos que se adapten mejor a las condiciones ambientales de un determinado lugar (Díaz *et al.*, 2000).

La complejidad de los estudios climáticos a nivel local se presenta en las zonas montañosas, debido a las variaciones que el relieve genera en el ambiente (temperatura, precipitación, viento, radiación, entre otros), generando cambios ambientales drásticos en distancias relativamente cortas estableciendo patrones en la distribución de la vegetación. Aunado a esto la falta de estaciones meteorológicas en dichas zonas dificultan la descripción de los elementos climáticos (Hoersch *et al.*, 2002; Vidal, 2005; Zacarías y Del Castillo, 2010).

Por lo tanto, se han desarrollado modelos explicativos que puedan lidiar con la falta de información climática, utilizando diferentes variables (Prudhomme y Reed, 1998). Un insumo de gran utilidad que puede ayudar a describir el comportamiento de los elementos climáticos y su estrecha relación con el relieve es el Modelo Digital de Elevación (MDE) (Hoersch *et al.*, 2002).

En Suecia aplicaron un modelo para obtener la distribución de la precipitación, el cual empleaba un MDE en combinación con la velocidad y dirección del viento, con una base de datos de 230 estaciones meteorológicas con registros de los años de 1982 a 1999 para una superficie de 447,435 kilómetros cuadrados (km²), arrojando una mejor descripción de la distribución estacional y un coeficiente de determinación (r^2) de 0.78, aunque también fue el

mismo r^2 para el escenario que consideró únicamente la topografía y la precipitación (figura 4). El error medio fue menor para el esquema de interpolación utilizando datos de viento (6,5%) comparado con el otro esquema (7.9%) (Johansson y Chen, 2004).

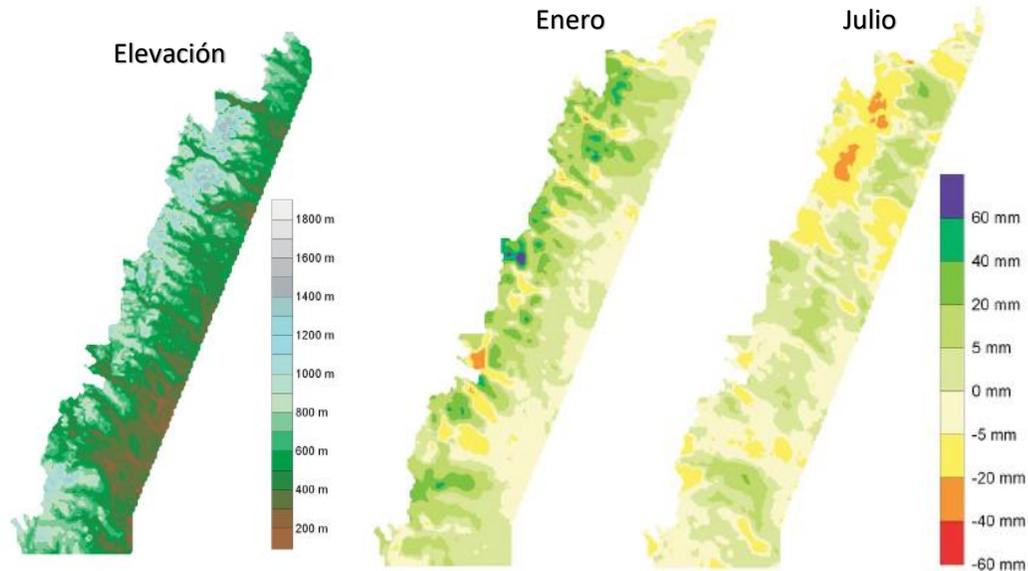


Figura 4. Diferencia entre esquemas de interpolación: con (enero) y sin (julio) información de viento.

Fuente: (Johansson y Chen, 2004)

En cambio, la temperatura a diferencia de la precipitación es uno de los elementos que tiene una marcada distribución vertical, ya que numerosas investigaciones han demostrado que, bajo condiciones normales en la tropósfera, la temperatura disminuye al ascender en altitud. Aunque la disminución no es uniforme, el promedio mundial es aproximadamente de 0.65°C por cada 100 metros de aumento en altitud, a esto se le conoce como gradiente de temperatura (Ayllón, 2003).

En Ecuador, desarrollaron una ecuación para la distribución altitudinal calculando los valores en donde no hay presencia de estaciones meteorológicas a partir de los datos de la variable climática a utilizar (temperatura, radiación solar, humedad relativa) con ayuda de un MDE interpolando pixel por pixel para una mejor representación visual del gradiente altitudinal (figura 5) y una mayor fiabilidad del comportamiento de la variable para regiones montañosas (Fries *et al.*, 2012).

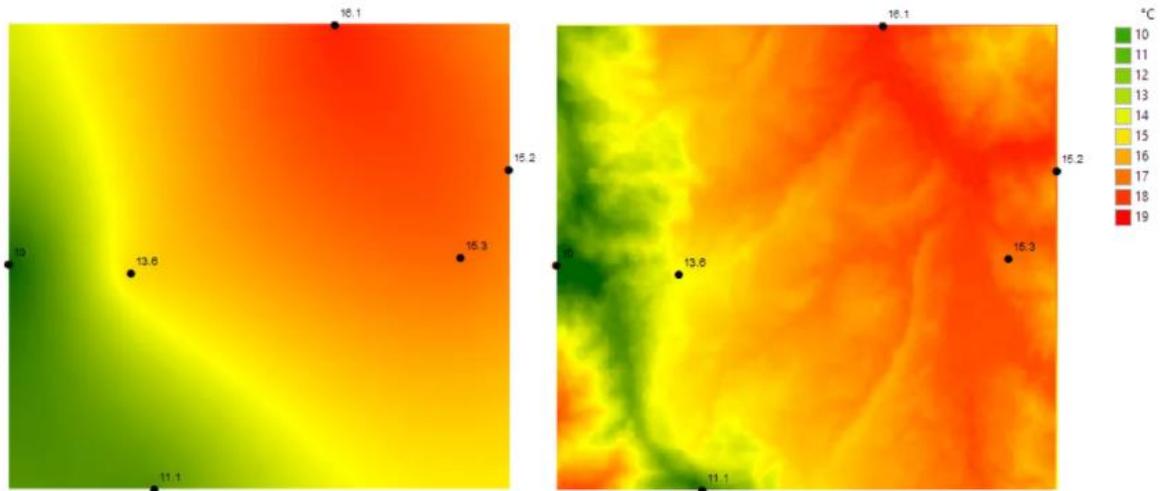


Figura 5. Diferencia entre la interpolación de datos de temperatura empleando Kriging (izquierda) y la interpolación considerando el gradiente altitudinal (derecha).

Fuente: (Pucha-Cofrep, 2012)

2.3. Implicaciones del clima y el suelo en el uso agrícola del suelo.

Las condiciones del medio natural como el clima y el suelo influyen en la distribución geográfica de las distintas especies vegetales, debido a que tienen relación con las características fisiológicas y el crecimiento de la vegetación. La aptitud climática o agroclimática se refiere a la satisfacción de las necesidades que requiere una especie de cultivo en una región en relación con los elementos climáticos (Salvatore *et al.*, 2010; Dubrovina y Bautista, 2014).

2.3.1. Clima

Con relación al clima, la temperatura y la precipitación son los elementos que inciden de manera directa con los ciclos vegetativos de las plantas cultivadas.

La temperatura interviene en los procesos fisiológicos de las plantas, los cuales se efectúan dentro de ciertos umbrales térmicos y varía de una especie a otra. Las altas temperaturas provocan deshidratación y marchitez de la planta, lo cual se debe a una gran evaporación de

la humedad del suelo. Por otra parte, las bajas temperaturas reducen la circulación del agua hacia la raíz (Ayllón, 2003).

Dentro de los umbrales térmicos, según el tipo y la variedad de las plantas se pueden distinguir los siguientes:

Tabla 1. Descripción de los umbrales térmicos

| Umbrales Térmicos | Descripción |
|--------------------------|---|
| Óptimo térmico | Las funciones fisiológicas se desarrollan sin ningún obstáculo. |
| Letal | Temperaturas máximas o mínimas que pueden ser soportadas por las diferentes plantas: los umbrales superior o inferior, son los valores térmicos por encima o debajo de los cuales el ciclo vegetativo se detiene. |

Fuente: (Fernández, 1996; Seoáñez *et al.*, 2002)

A continuación, se muestran algunos ejemplos de cultivos y sus umbrales térmicos.

Tabla 2. Ejemplos de umbrales térmicos para el desarrollo de diferentes especies.

| Especie | Letal inferior | Umbral inferior | Intervalo óptimo | Umbral superior | Letal superior |
|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| Espárragos | 0 °C | 10 °C | 25-30 °C | 35 °C | 40.5 °C |
| Remolacha | -1 °C | 4 °C | 10-29 °C | 35 °C | 40.5 °C |
| Maíz | 0.5 °C | 10 °C | 16-35 °C | 40.5 °C | 41.4 °C |
| Lechuga | 0 °C | 2 °C | 10-27 °C | 29.5 °C | 35 °C |
| Cebolla | 0 °C | 2 °C | 10-35 °C | 35 °C | 38 °C |
| Guisantes | -1 °C | 4 °C | 4-24 °C | 29.5 °C | 35 °C |
| Tomate | 2 °C | 10 °C | 16-29 °C | 35 °C | 35 °C |

Fuente: (Fernández, 1996; Ornelas *et al.*, 2016)

Para el caso del maíz las temperaturas menores a 10°C reduce significativamente el proceso de germinación, mientras que las temperaturas por arriba de 38°C más el estrés hídrico¹ durante la formación de mazorca y el espigamiento impiden la formación de grano (Corral *et al.*, 2013).

Por otra parte, la precipitación ayuda a la frondosidad de la vegetación y por ende a la producción de los cultivos. Lo cual adquiere una mayor relevancia en la agricultura de temporal que no cuenta con un sistema de captación de agua e irrigación. De tal forma, se

¹ El estrés hídrico ocurre cuando la transpiración excede el agua absorbida por las raíces (Luna *et al.*, 2012).

tienen que tomar en cuenta la cantidad de lluvia que requiere cada tipo de cultivo (Ayllón, 2003; Granados *et al.*, 2004).

Tabla 3. Precipitación en milímetros adecuada para el desarrollo de diferentes especies.

| <i>Cultivo</i> | <i>Precipitación (milímetros)</i> |
|----------------|-----------------------------------|
| Maíz | 700-1000 |
| Aguacate | 1,000-1,150 |
| Guayaba | 600-1,000 |
| Mango | 1,200-1,500 |
| Melón | 600-1,200 |

Fuente: (Ornelas *et al.*, 2016)

2.3.2. El suelo

El suelo es un cuerpo natural localizado sobre la superficie terrestre, el cual se encuentra distribuido como un continuo en el paisaje con variaciones determinadas por las condiciones lito-climáticas del sitio, el drenaje y la historia geomorfológica. Por estas razones, el suelo varía en el paisaje (Cotler *et al.*, 2007).

Es indiscutible que el abastecimiento de alimentos para la humanidad depende del suelo debido a que es capaz de sostener y suministrar nutrientes a las plantas (Cotler *et al.*, 2007; Bautista *et al.*, 2011); el establecimiento de los cultivos debe adaptarse a la capacidad o aptitud del suelo.

La aptitud agrícola del suelo se define como la capacidad de un lugar específico para producir un cultivo determinado con base en las condiciones agroclimáticas. Los indicadores agroclimáticos son las expresiones cuantitativas entre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en relación con los elementos climáticos. Se puede considerar un solo elemento (horas de frío, temperatura mensual, precipitación total anual) o combinar elementos (precipitación y temperatura) (Granados *et al.*, 2004).

2.4. Modelos de aptitud climática de los usos del suelo agrícolas.

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, el cual es utilizado para interpretar un conjunto de datos y poder comprender mecanismos causales y procesos de un determinado fenómeno (Villa *et al.*, 2012).

La incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha incrementado el nivel de entendimiento en la toma de decisión ambiental, apoyando en la generación y diagnóstico de soluciones alternativas (Buenrostro *et al.*, 2005).

El uso de SIG facilita la modelación de la información específica para la planeación de las actividades agrícolas. Siendo una de las principales herramientas utilizadas para disminuir los riesgos climáticos a los que se encuentra sometida la agricultura y representar espacialmente la aptitud del suelo a un determinado uso (Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006).

Existen diversos trabajos de modelos de aptitud agroclimática para representar e identificar la distribución espacial y las condiciones climáticas óptimas de los cultivos, los cuales emplean diferentes variables. A continuación, en la tabla 4 se muestran algunos de ellos.

Tabla 4. Trabajos sobre aptitud agroclimática y sus variables empleadas

| | |
|---|--|
| <p>Trabajo: Aptitud agroclimática para la cuenca Balsas-Mezcala, México</p> <p>VARIABLES UTILIZADAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura media anual • Precipitación anual • Edafología • Uso de suelo y vegetación • Pendiente | <p>Referencia: (Espejel <i>et al.</i>, 2015)</p> |
| <p>Trabajo: Aptitud agroclimática en la Mesa Central de Guanajuato, México</p> <p>VARIABLES UTILIZADAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura media anual • Temperatura máxima • Temperatura mínima • Precipitación anual • % de sequía relativa • Granizadas • Heladas | <p>Referencia: (Granados <i>et al.</i>, 2004)</p> |
| <p>Trabajo: Caracterización agroclimática del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa para el Cacao en Cuba</p> <p>VARIABLES UTILIZADAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación media anual • Temperatura media anual | <p>Referencia: (Suárez <i>et al.</i>, 2015)</p> |

| | |
|---|---|
| <p>Trabajo: Aptitud agrícola de las tierras de agricultura en el estado de Guanajuato, México</p> <p>VARIABLES UTILIZADAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación anual • Temperatura promedio anual • Profundidad del suelo • Textura del suelo • Pendiente | <p>Referencia: (García <i>et al.</i>, 2001)</p> |
| <p>Trabajo: Aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de la Huasteca, México</p> <p>VARIABLES UTILIZADAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación media anual • Temperatura promedio anual • Edafología • Pendiente • Índice de sequía | <p>Referencia: (Aguilar <i>et al.</i>, 2010)</p> |

Elaboración Propia

Uno de los cuestionamientos a estos trabajos son las escalas de salidas de los mapas de aptitudes agroclimáticos, debido a que son escalas que van desde 1:250,000 a 1:1,000,000. Las recomendaciones que dan los autores hacen énfasis en el levantamiento de datos en campo en variables como el tipo, textura y profundidad del suelo, así como también en el uso de suelo y vegetación. Además de series de datos climáticos con más de 20 años de registro.

2.4.1. Modelo de lógica difusa (Fuzzy)

La lógica difusa es una generalización del álgebra booleana donde los valores de las variables oscilan entre 0 (no apto) y 1 (apto). Se emplea para modelar entidades que contienen atributos con zonas de transición gradual que no presentan fronteras claras (García *et al.*, 2001; Tran *et al.*, 2002; Buenrostro *et al.*, 2005).

Para el caso de los modelos de aptitud climática dependiendo la variable a utilizar se deben de conocer los puntos de inflexión (*a*, *b*, *c* y *d*) que corresponden a los valores extremos y óptimos de las variables (figura 6).

Enseguida, se muestra un ejemplo con datos de precipitación suponiendo que los valores óptimos de un cultivo oscilan entre los 700 mm y 900 mm de lluvia anual, mientras que su umbral letal se encuentra por debajo de los 200 mm y por encima de los 1,250 mm.

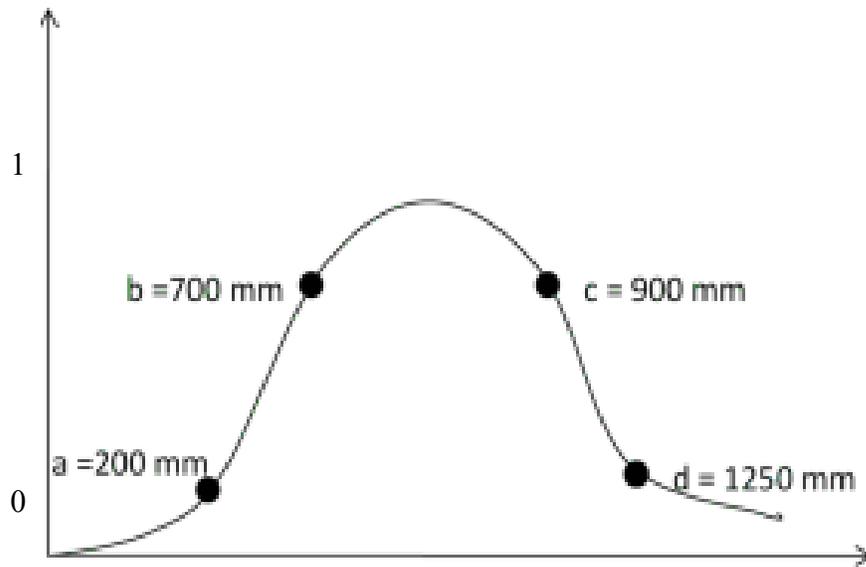


Figura 6. Ejemplo de la curva de Gauss con los umbrales de precipitación. Elaboración propia.

La curva nos indica lo siguiente:

- Cuando la precipitación se encuentra por debajo de los 200 mm y por encima de los 1,250 mm, las condiciones no son aptas para el desarrollo del cultivo.
- Cuando la precipitación se encuentra entre los 200-700 mm y entre 900-1,250 mm, las condiciones son moderadamente aptas.
- Cuando la precipitación se encuentra entre los 700 mm y los 900 mm, las condiciones son aptas.

Capítulo 3: Métodos

3.1. Caracterización geográfica del área de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica

El municipio de Zitácuaro se localiza al oriente dentro del estado de Michoacán entre los paralelos 19°18' y 19°34' de latitud norte y entre los meridianos 100°10' y 100°30' de longitud oeste. Dentro del estado de Michoacán colinda con los municipios de Ocampo, Tuxpan, Jungapeo, Juárez y Susupuato y, por parte del estado de México con los municipios de San José del Rincón, Villa de Allende, Donato Guerra e Ixtapan del Oro (INEGI, 2010b). Cabe mencionar que también alberga parte de la RBMM (figura 7).

La reserva se decretó en el año de 1986 como un ANP con una superficie de 16,110 ha con prohibición de tala dentro de la zona núcleo de 4,490 ha (DOF, 1986). Actualmente cuenta con una superficie de 56,259 ha con prohibición de tala de 13,551 ha de la zona núcleo (DOF, 2000). Se localiza en la región limítrofe de Michoacán y del estado de México, distribuida en 20 municipios (tabla 5) que conforman la Región de la Mariposa Monarca (Ramirez y Zubieta, 2005).

Tabla 5. Municipios que conforman la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

| <i>Estado</i> | <i>Municipios</i> |
|---------------|---|
| Michoacán | Angangueo, Aporo, Contepec, Irimbo, Juárez, Jungapeo, Maravatio, Ocampo, Senguio, Susupuato, Tlalpujahuá, Tuxpan y Zitácuaro. |
| México | Donato Guerra, Ixtapan del Oro, El Oro, San José del Rincón, Temascalcingo, Villa de Allende y Villa Victoria. |

El ANP se creó con la finalidad de conservar las zonas de hibernación de la mariposa monarca (*Danaus plexipus*), pero la región está expuesta a problemas ambientales como la pérdida o degradación de la vegetación natural (Rendón *et al.*, 2005).

En 2003 una investigación sobre los cambios de cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo ubicó mediante interpretación visual y verificación en campo con ayuda de fotografías aéreas e imágenes Landsat ETM durante el periodo de 1971, 1994 y 2000, que

1,092 ha de bosque fueron deforestadas. Las principales causas son la sobreexplotación forestal y agropecuaria (Ramírez *et al.*, 2003).

Para el periodo de 2000 a 2003 la pérdida de cubierta boscosa sobrepasó las 3,200 ha (Ramírez y Zubieta, 2005), mientras que para el año 2012 la pérdida aumentó a 4,300 ha promediando tasas medias anuales de pérdida hasta de 2.4%, haciendo visible que el incremento de la pérdida de la vegetación natural se da justo después de la ampliación de la RBMM (Ramírez *et al.*, 2015).

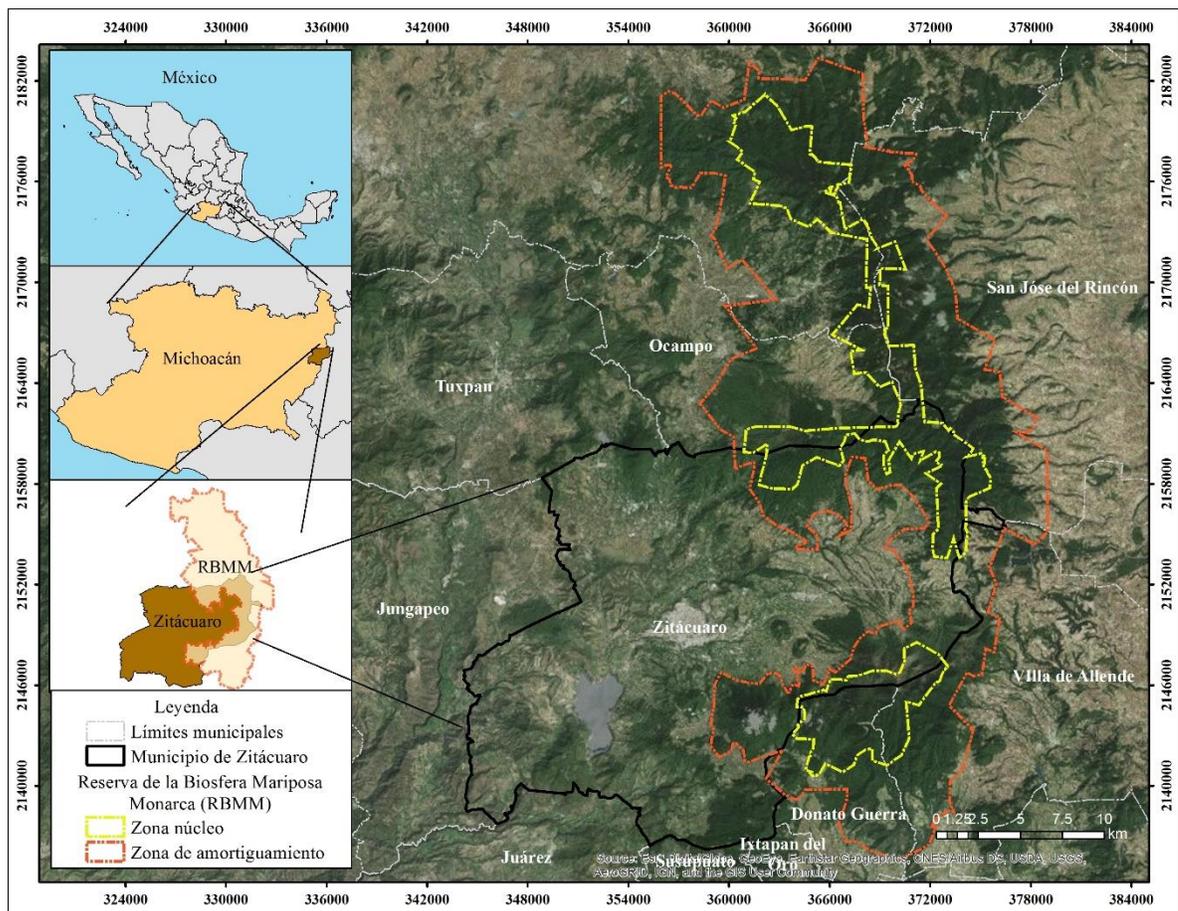


Figura 7. Ubicación geográfica del municipio de Zitácuaro, Michoacán y porción de la RBMM que le corresponde.

3.1.2. Relieve y clima

La altitud comprende desde los 1,200 hasta los 3,400 msnm, lo que ocasiona que en distancias relativamente cortas se presenten diferentes tipos de clima. En todos los tipos de clima

descritos a continuación, la presencia de las lluvias se da en la época de verano con un rango entre 800 a 1,100 milímetros (mm) (SEMARNAT, 2007; INEGI, 2010b).

Tabla 6. Características de los climas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán.

| Tipo de clima | Características |
|---------------|---|
| Cb'(w2) | Semifrío subhúmedo con verano fresco largo, con la temperatura media anual entre 5 y 12 °C, del mes más frío entre -3 y 18 °C y del mes más cálido bajo los 22°C. |
| C(w1): | Templado subhúmedo con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, del mes más frío entre -3°C y 18°C y del mes más caliente bajo 22°C. |
| (A)C(w1) | Semicálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 18°C, del mes más frío menor de 18°C y del mes más caliente mayor de 22°C. |
| Aw1 | Cálido subhúmedo con una temperatura media anual mayor de 22°C y del mes más frío mayor de 18°C. |

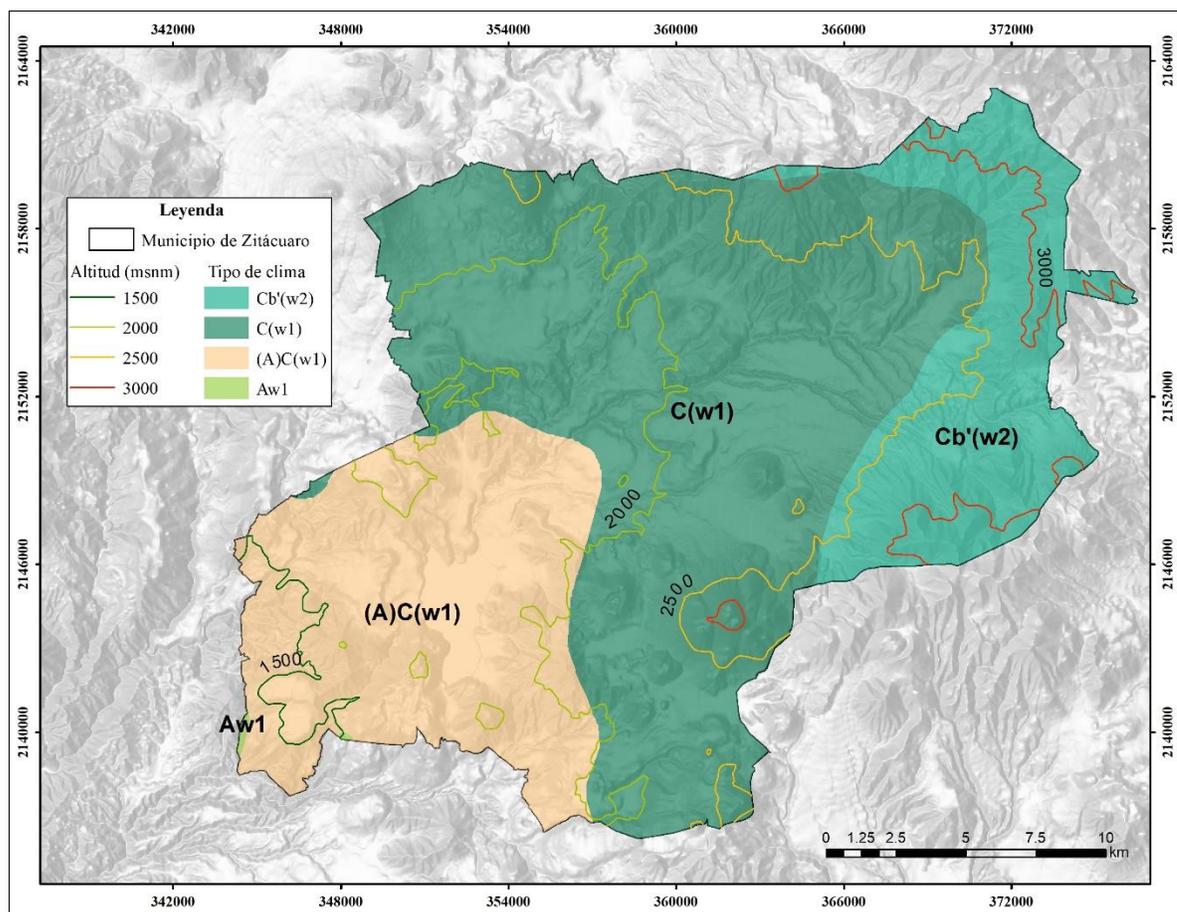


Figura 8. Tipos de clima dentro del municipio de Zitácuaro, Michoacán.

Fuente: Propuesta de Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Mariposa Monarca (POETMM), 2007.

3.1.3. Edafología

Los suelos que se encuentran dentro del municipio son el Andosol, Acrisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Regosol y Vertisol (SEMARNAT, 2007).

Tabla 7. Características de los tipos de suelo en el municipio de Zitácuaro, Michoacán.

| <i>Tipo de suelo</i> | <i>Características</i> |
|----------------------|--|
| Andosol | Característico de zonas bien drenadas con clima templado y frío con alta capacidad de retención de humedad y una fuerte tendencia hacia la acidez. |
| Acrisol | En el subsuelo presenta acumulaciones de arcillas iluviales que son una limitante en el manejo agrícola por sus propiedades expansivas, presentan una aptitud natural para sostener selvas y bosques. |
| Litosol | Altamente susceptible a la erosión por ser muy delgados y poco desarrollados. Presentan drenaje excesivo si hay mayor porcentaje de arena y eficiente si contiene texturas medias y finas, con aptitud netamente forestal. |
| Vertisol | Suelos de origen aluvial y residual, tienen un 30% de arcilla expandible, debido a esta condición presenta agrietamiento en el periodo seco del año y provoca problemas de inundaciones en épocas de lluvias. |

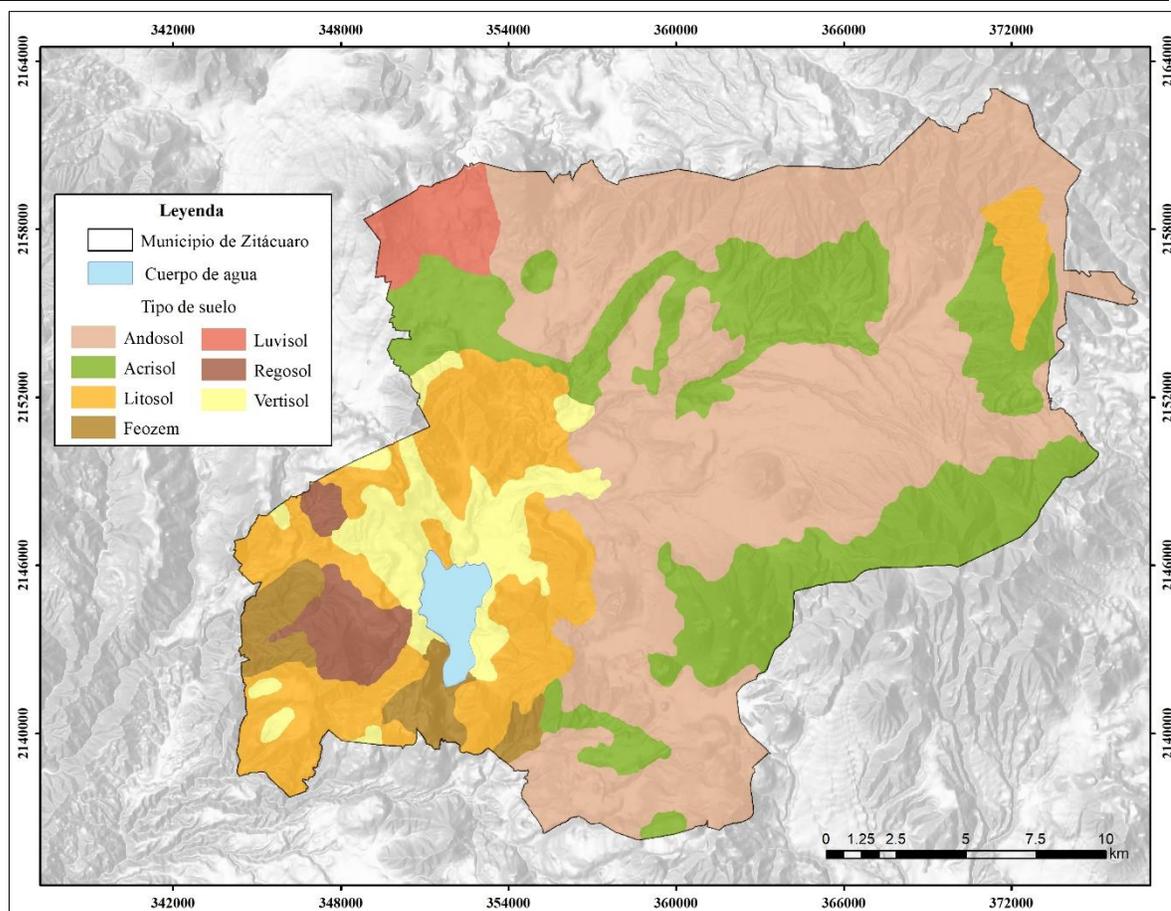


Figura 9. Tipos de suelo en el municipio de Zitácuaro, Michoacán. **Fuente:** Propuesta de Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Mariposa Monarca (POETMM), 2007.

3.1.4. Uso de suelo y vegetación

El territorio del municipio abarca casi las 51,000 ha. El uso de suelo que cuenta con mayor proporción es la agricultura con un 40% a diferencia de la zona urbana que cuenta con el 6%. La vegetación con mayor cobertura es la forestal con un 45%, le sigue la selva con el 6% y por último, se tiene un 3% de pastizal inducido (INEGI, 2010b).

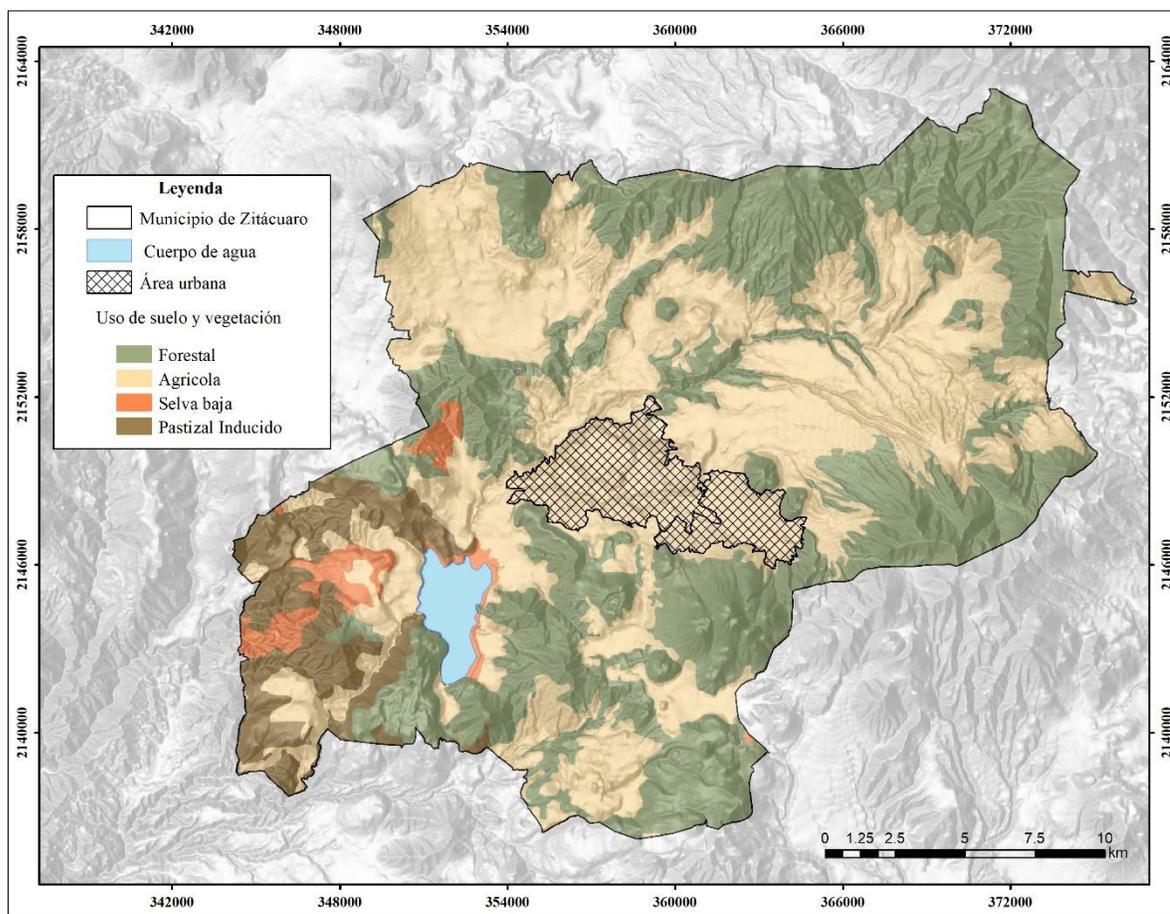


Figura 10. Uso de suelo y vegetación en el municipio de Zitácuaro, Michoacán.

Fuente: Uso de suelo y Vegetación, Serie V de INEGI, 2010.

3.1.5. Componente socioeconómico

La población total es de 155,534 personas, pero solamente 56,556 son económicamente activas, dentro de este número el 18 por ciento (%) se desenvuelve en el sector primario (INEGI, 2010a). Zitácuaro forma parte del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) llamado con el mismo nombre, el cual lo conforman los municipios de Angangueo, Aporo, Contepec,

Epitacio Huerta, Hidalgo, Irimbo, Jungapeo, Juárez, Maravatío, Ocampo, Senguío, Susupuato, Tlalpujahuá y Tuxpan (SIAP, 2015).

El DDR, en el año 2004 contaba una superficie agrícola de poco más de 106,000 ha, la cual se extendió para el año 2015 a más de 115.000 ha. En este aumento de superficie dedicada a la agricultura sobresalen los cultivos de aguacate (pasó de 1,314 ha a 2,002 ha), la guayaba (de 6,924 ha a 7,431) y la zarzamora (de 87 ha a 88) (SIAP, 2015).

Este crecimiento se debe al alto valor comercial de los cultivos lo que origina su establecimiento y expansión al ser la agricultura una de las principales fuentes de ingreso para la población.

Tabla 8. Aumento de la superficie sembrada por cultivos en el municipio de Zitácuaro.

| Cultivos | 2004 | 2015 |
|---------------|--------------------------|-------|
| | Superficie sembrada (ha) | |
| Aguacate | 995 | 1,238 |
| Guayaba | 1,550 | 1,572 |
| Zarzamora | 24 | 35 |
| Maíz de grano | 8,645 | 7,428 |

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2015.

3.2. Inventario de usos agrícolas e identificación de condiciones climáticas idóneas.

3.2.1. Materiales.

- Imágenes de satélite de alta resolución
 - Fuente: Google Earth
 - Proveedor: Digital Globe
 - Fechas de las imágenes: 2015-2016
 - Escala de interpretación: 1:5,000
- Sistema de Información Geográfica: ArcMap 10.4
- Visualizador: ArcBruTile

3.2.2. Inventario de usos de suelo agrícola

Con base al conocimiento de la zona se identificaron usos del suelo agrícolas en imágenes satelitales que incluyen: cultivos herbáceos (maíz, calabaza y trigo), monocárpico (maguey), plantaciones frutícolas (guayaba, aguacate, zarzamora y durazno) y plantaciones arbóreas no maderables (árboles de navidad).

La interpretación consistió en identificar patrones en la estructura y tonalidades de las parcelas, lo que conllevó a realizar una digitalización a escala 1:5,000. También se consultó literatura para apoyar la determinación de los patrones espaciales de los principales cultivos o plantaciones frutícolas (tabla 9).

Tabla 9. Patrones en la estructura de las parcelas para la identificación de los usos agrícolas

| Cultivo | Distancia entre plantas y/o árboles | Método de siembra y distancia de separación |
|-----------|-------------------------------------|---|
| Maíz | 20 a 25 cm | Surco (75 a 90 cm) |
| Aguacate | 7 a 12 m | Distancia |
| Zarzamora | 80 a 100 cm | Filas (1.5 a 2.5 m) |
| Guayaba | 5x5 y 6x6 m | Tresbolillo (triángulo o hexágono) |

Elaboración Propia. Fuente: (Mendoza *et al.*, 2004; Pérez y Vázquez, 2004; Bonilla, 2009; SAGARPA, 2011)

Estos cultivos presentan características y, patrones bien definidos que pueden ser fácilmente identificadas en imágenes de alta resolución (figura 11).

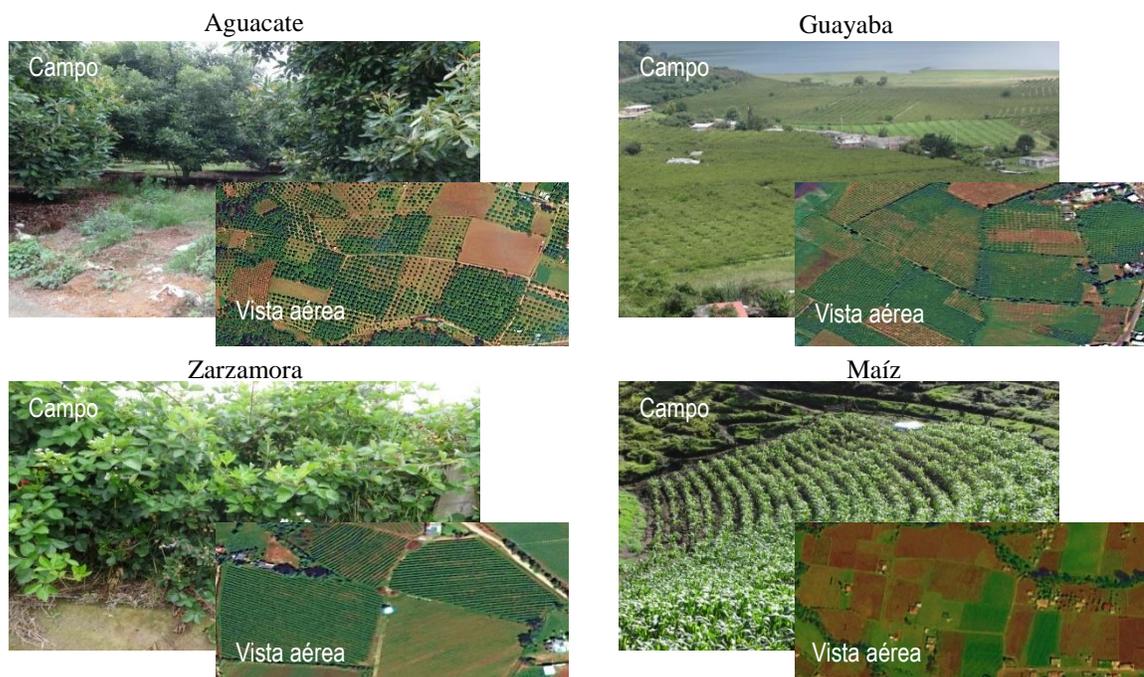


Figura 11. Composición y estructura de las parcelas de los cultivos en campo (fotos tomadas en campo) y en imágenes de satélite (Google Earth).

3.2.3. Verificación en campo

En las parcelas que no se logró encontrar características claras para reconocer el cultivo por medio de percepción remota, se procedió a identificarlas en campo como también se corroboraron las parcelas identificadas mediante percepción remota. En total se verificaron 292 puntos GPS tanto para corroborar los usos fotointerpretados (217) como para marcar la categoría de las parcelas clasificadas en campo (75).

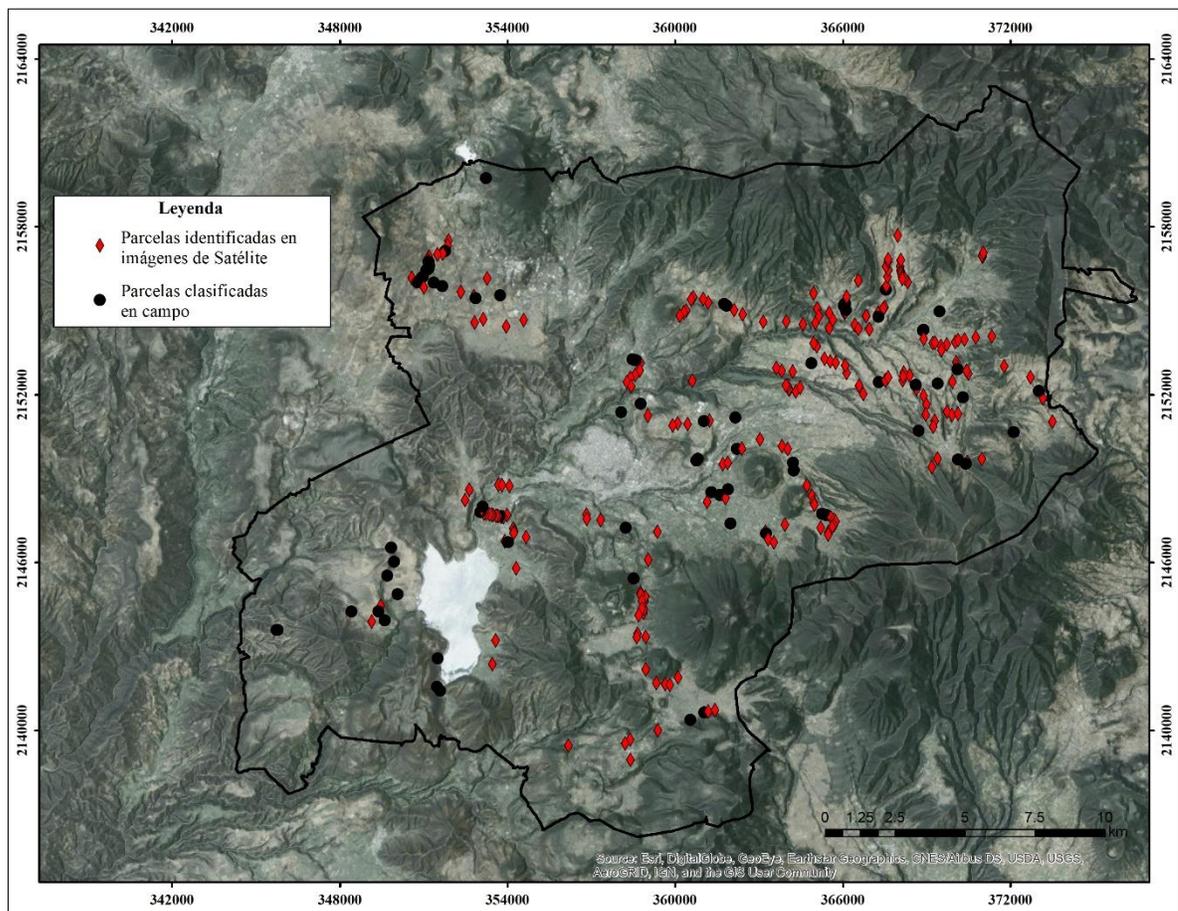


Figura 12. Distribución de los puntos de verificación en campo.

3.2.4. Encuestas a agricultores

Se realizaron 35 encuestas (anexo 1) a agricultores en diferentes localidades del municipio, quienes eran los encargados (trabajadores o dueños) de las parcelas con los diferentes usos del suelo agrícolas (tabla 10). El 80% de los encuestados eran trabajadores contratados con

edades entre 25 y 60 años. El 20% eran poseedores de la parcela y todos ellos adultos mayores de 60 años.

El propósito de la encuesta fue saber los tipos de cultivos que trabajan los agricultores, en qué fechas siembran y cosechan y, cuáles son los riesgos meteorológicos a los que se enfrentan.

Tabla 10. Ubicación y número de las encuestas realizadas por uso agrícola en el área de estudio

| <i>Uso Agrícola</i> | <i>No. encuestas</i> | <i>Localidades</i> |
|---------------------|----------------------|--|
| Maíz | 10 | <ul style="list-style-type: none"> • Francisco Serrato (San Bartolo) • Crescencio Morales (San Mateo) • El lindero • Macho de Agua (quinta manzana de Crescencio Morales) • El pedregal |
| Aguacate | 5 | <ul style="list-style-type: none"> • Carpinteros • El Santísimo (quinta manzana de Crescencio Morales) • La Soledad (cuarta manzana de Francisco Serrato) • La colonia de Aputzio |
| Guayaba | 5 | <ul style="list-style-type: none"> • La Encarnación • La palma • La Y Griega • Ignacio López Rayón (Coyota primera manzana) |
| Zarzamora | 5 | <ul style="list-style-type: none"> • La Encarnación • Loma Larga • La Calera |
| Durazno | 5 | <ul style="list-style-type: none"> • San Francisco Curungueo • Puentecillas (tercera manzana de Zirahuato) • Toma de Agua |
| Trigo | 3 | <ul style="list-style-type: none"> • El tigrito (segunda manzana de Crescencio Morales) • La Capilla (tercera manzana de Francisco Serrato) • El Capulín (tercera manzana de Crescencio Morales) |
| Maguey | 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Toma de Agua |
| Calabaza | 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Francisco Serrato (San Bartolo) |

3.2.5. Condiciones climáticas idóneas para el desarrollo de los cultivos.

Considerando la bibliografía especializada y las encuestas realizadas a los agricultores, se identificaron los rangos de temperatura y precipitación, así como eventos extremos de riesgo, para generar un calendario para cada cultivo o plantación (tabla 11).

Tabla 11. Condiciones climáticas idóneas anuales para el desarrollo de los cultivos.

| Cultivos y plantaciones | Temperatura mínima | Temperatura idónea | Temperatura máxima | Precipitación anual | Referencias |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---|
| Aguacate | 10°C-17°C | 18°C-25°C | 26°C-33°C | 800-1600 mm | (Alcántara <i>et al.</i> , 1999; Cerdas <i>et al.</i> , 2006; Lemus <i>et al.</i> , 2010; Garbanzo Solís, 2011; SAGARPA, 2011; Morales <i>et al.</i> , 2013; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: Con temperaturas más bajas no presenta cuaje de frutos. La temperatura óptima es de 20°C, mientras que mayores a 33°C causan esterilización del polen. La precipitación debe de ser bien distribuida durante todo el año. | | | | | |
| Durazno | 4°C-14°C | 15°C-22°C | 23°C-26°C | 1200-1800 mm | (Coria <i>et al.</i> , 2005; Avendaño, 2012; Ruíz <i>et al.</i> , 2013; Pinzón <i>et al.</i> , 2014) |
| Observaciones: Temperatura mínima diaria es de -2 a -4 °C y la temperatura óptima es de 18 a 20°C. La precipitación debe de ser bien distribuida durante todo el año. | | | | | |
| Guayaba | 15°C-22°C | 23°C-27°C | 28°C-30°C | 1000-1200 mm | (Mendoza <i>et al.</i> , 2004; García, 2010; IIFT, 2011; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: En el rango de 23 a 27°C se obtiene el mayor rendimiento. Es más resistente a la sequía que la mayoría de los frutales tropicales (precipitación mínima: 600 mm). Distribuida durante todo el año. | | | | | |
| Zarzamora | 8°C | 17°C-22°C | 32°C | 900 mm | (Pérez y Vázquez, 2004; Argote, 2012; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: Los valores más altos de temperatura son durante los meses de marzo a junio y los más bajos de diciembre a febrero. Precipitación de mayo a agosto. | | | | | |
| Magüey | 10°C-15°C | 16°C-26°C | 27°C-35°C | 320-720 mm | (Ruiz <i>et al.</i> , 2002; Martínez y Pérez, 2008; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: La temperatura óptima es de 20°C. Distribuida durante todo el año. | | | | | |
| Pinus Ayacahuite | -2°C-5°C | 14°C-22°C | 26°C-34°C | 733-1269 mm | (López y Mateo, 2006; Gómez-Mendoza <i>et al.</i> , 2008; CONAFOR, 2012; Guitérrez y Trejo, 2014) |
| Observaciones: Periodo de lluvia de abril a octubre. | | | | | |
| Maíz Criollo | 10°C-17°C | 18°C-26°C | 27°C-33°C | 300-1000 mm | (Bonilla, 2009; Deras, 2011; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: Germinación: 20 a 25 °C, Crecimiento: 20 a 30 °C y Floración: 21 a 30 °C. La cantidad óptima de lluvia es de 550 mm de marzo a noviembre. | | | | | |
| Trigo | 3°C-10°C | 11°C-25°C | 26°C-33°C | 375-800 mm | (Novoa y Villaseca, 1987; Félix <i>et al.</i> , 2009; Sepúlveda y Torres, 2012; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: Amacollo: 4 a 18 °C, Encañe: 8 a 22 °C, Floración: 10 a 24 °C y Llenado de grano: 12 a 26 °C. La cantidad óptima de lluvia es de 400-500 mm de junio a noviembre. | | | | | |
| Calabaza | 15°C-19°C | 20°C-25°C | 26°C-30°C | 300-450 mm | (IICA-Nicaragua, 2007; CONABIO, 2012; Ruíz <i>et al.</i> , 2013) |
| Observaciones: Con temperaturas más bajas la germinación es lenta, porque es muy sensible al daño por frío. La temperatura óptima es de 23°C. De marzo a junio. | | | | | |

3.3. Modelos de variación altitudinal mensual

3.3.1. Materiales

- Modelo Digital de Elevación a 15 metros por pixel
 - Fuente: INEGI
- Software: Rstudio 3.3.2 (R Development Core Team) y ArcMap 10.4 (Esri)

Tabla 12. Estaciones meteorológicas y su descripción de registro de datos

| Institución | | No. estaciones | Periodo de observación | Variables para el estudio. | Consideraciones |
|--|---------------|----------------|------------------------|--|--|
| Servicio Nacional (SMN). | Meteorológico | 13 | 24 horas | Temperatura (°C) Precipitación (mm) | |
| Estación Automática (EMAs-SMN) | Meteorológica | 1 | 10 minutos | Temperatura (°C) Precipitación (mm) | |
| Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). | | 2 | 1 hora | Temperatura (°C) Precipitación (mm) | Registra datos en horario TUC o UTC (Tiempo Universal Coordinado). |

Tabla 13. Descripción de las estaciones meteorológicas

| Nombre de la estación | Latitud | Longitud | Altitud | Institución | Años de registro | Estado |
|------------------------|---------|----------|---------|-------------|------------------|-----------|
| Monarca II | 2160867 | 364661 | 2970.2 | EMAs-SMN | 3 | Michoacán |
| Lindero | 2152618 | 372787 | 2755 | CIGA | 4 | Michoacán |
| Cuesta del Carmen | 2152166 | 374044 | 2750 | SMN | 32 | México |
| Macheros | 2141358 | 364158 | 2435 | CIGA | 12 | México |
| San Pablo Malacatepec | 2142177 | 378176 | 2383 | SMN | 21 | México |
| Asunción Donato Guerra | 2135420 | 379076 | 2183 | SMN | 15 | México |
| Presa El Bosque (CFE) | 2143788 | 354765 | 1909 | SMN | 49 | Michoacán |
| Zitácuaro | 2149309 | 356489 | 1870 | SMN | 48 | Michoacán |
| Tuxpan | 2164211 | 347899 | 1800 | SMN | 32 | Michoacán |
| Presa Tuxpan (CFE) | 2163792 | 345168 | 1750 | SMN | 34 | Michoacán |
| Presa Tuxpan | 2161252 | 344516 | 1747 | SMN | 25 | Michoacán |
| La Encarnación | 2147118 | 353636 | 1720 | SMN | 33 | Michoacán |
| Ixtapan del Oro | 2130745 | 366958 | 1719 | SMN | 25 | México |
| San José Purúa | 2154944 | 344357 | 1572 | SMN | 11 | Michoacán |
| Susupuato de Guerrero | 2125215 | 352093 | 1260 | SMN | 32 | Michoacán |
| Jungapeo | 2152404 | 343600 | 1248 | SMN | 53 | Michoacán |

3.3.2. Obtención de datos climáticos

Los datos de las estaciones sinópticas se descargaron de la página del Servicio Meteorológico Nacional-<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>-(CONAGUA,

2016). Los datos de la EMA se solicitaron a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los datos de las estaciones meteorológicas CIGA se descargaron directamente en campo cada 4 meses, siguiendo la periodicidad establecida desde su instalación a la fecha.

3.3.3. Corrección del Tiempo Universal Coordinado

La Estación Meteorológica Automática EMA-SMN, registra los datos en Tiempo Universal Coordinado (UTC por sus siglas en inglés). Por lo que, para nuestra área de estudio, ubicada en UTC+6, al dato horario de todos los registros se les restaron 6 horas transformar la base de datos en hora local (figura 13).

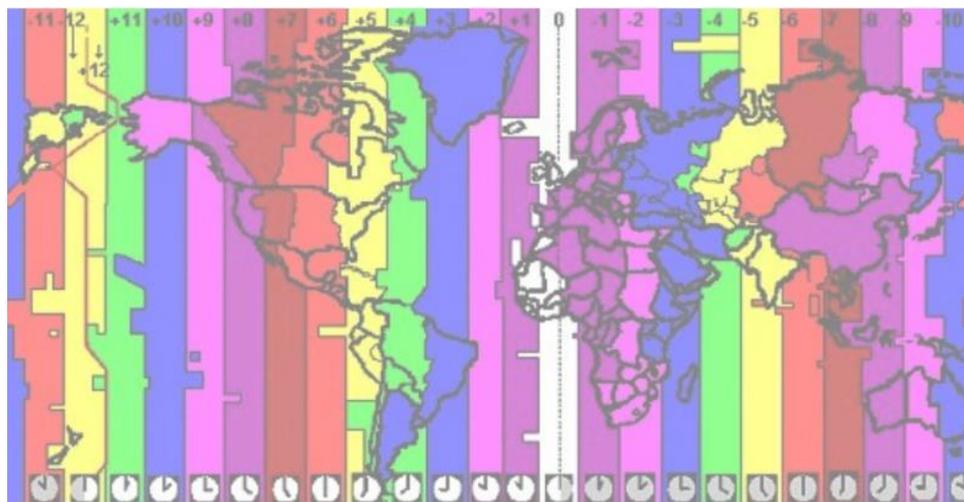


Figura 13. Zonas horarias en el mundo.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

3.3.4. Ubicación y periodo del registro de datos de las estaciones

Se seleccionaron en total 14 estaciones meteorológicas del SMN y 2 estaciones con las que cuenta en el área de estudio el CIGA. La mayoría de ellas con registros mayores a 15 años.

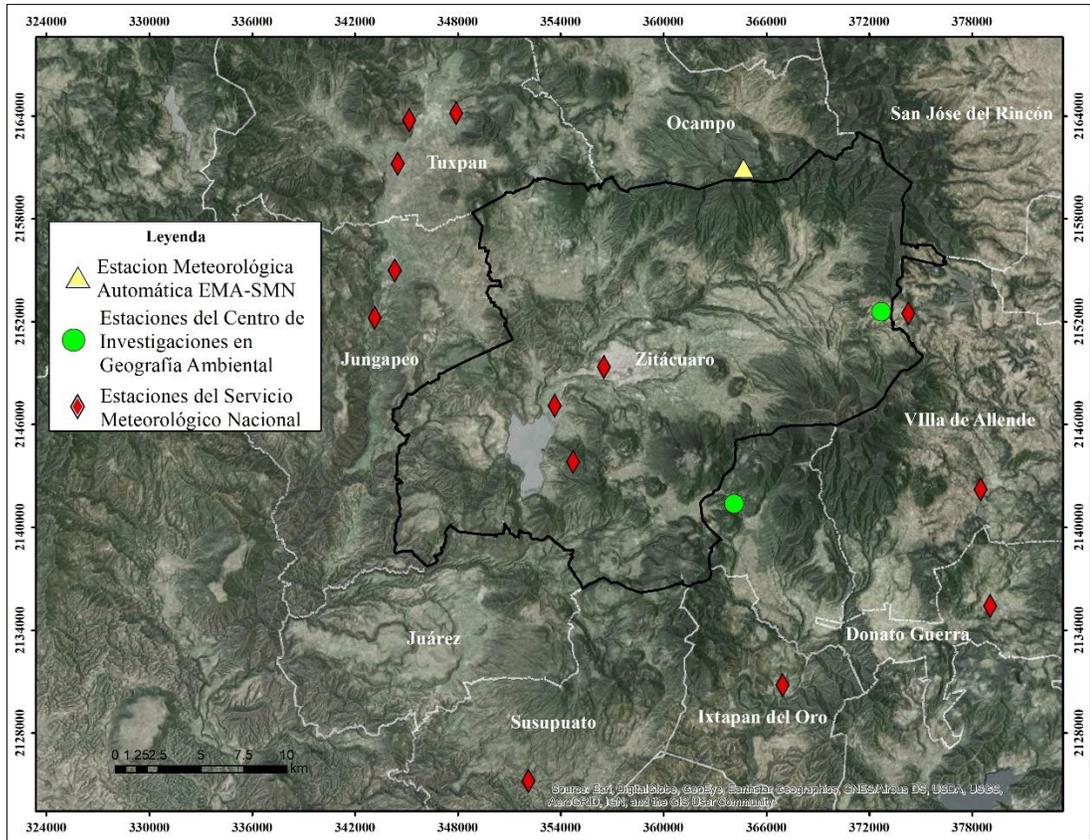


Figura 14. Ubicación de las estaciones meteorológicas

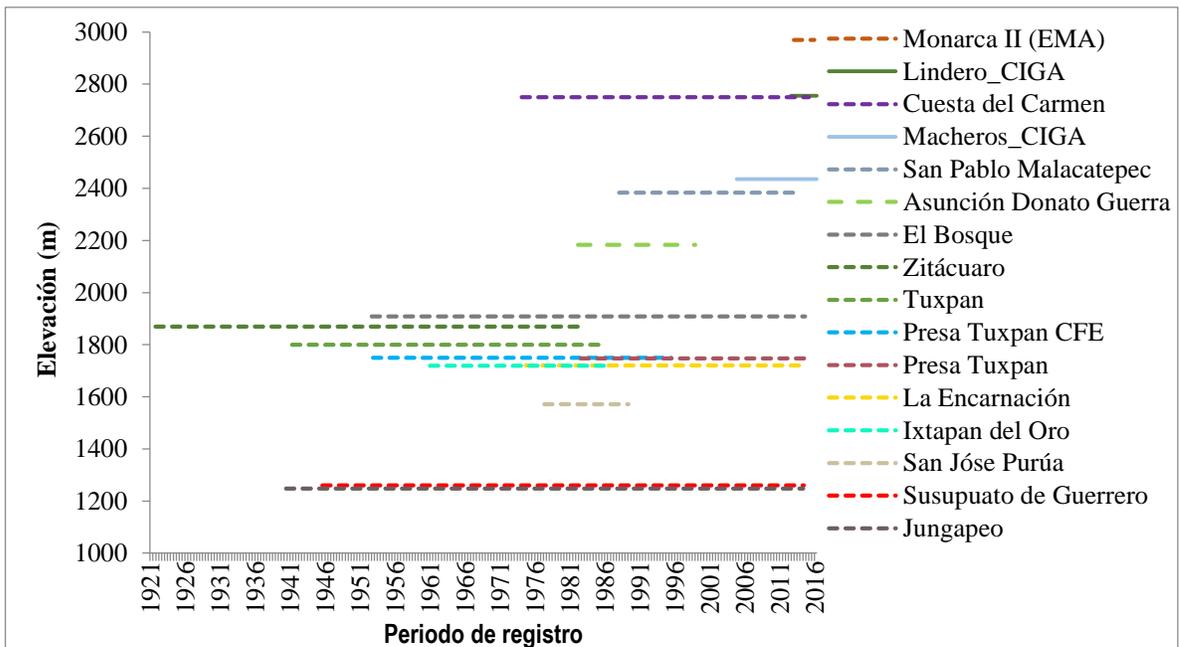


Figura 15. Periodo de registro de las series de las estaciones meteorológicas consideradas

3.3.5. Normalización de la información

Para todas las estaciones meteorológicas se consideró un dato diario para cada una de las variables, las cuales son la temperatura mínima y máxima que se registró en un día, mientras que la precipitación fue el acumulado en un día. Con base en esto, se procedió a obtener el promedio mensual de la temperatura y la acumulación de la precipitación para todos los años de registro de cada una de las estaciones (Gómez y Medina, 2012).

Después, se obtuvieron los promedios mensuales de las temperaturas mínimas y máximas, como también las acumulaciones de las precipitaciones para obtener un promedio normalizado de los promedios en relación a los años de registro con los que cuenta cada estación meteorológica (Faraway, 2006). Por ejemplo:

Tabla 14. Tabulación de los datos de la estación y promedio normalizado.

| Promedio de la temperatura máxima mensual | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 1992 | 21.5 | 22.1 | 26.7 | 27.8 | 28.4 | 27.3 | 24.8 | 23.7 | 23.8 | 24.3 | 23.3 | 24.2 |
| 1993 | 24.2 | 25.4 | 27.2 | 29.1 | 30.1 | 26.8 | 24.6 | 24.9 | 24.9 | 26.3 | 25.9 | 25.6 |
| 1994 | 25.9 | 26.4 | 28.3 | 28.3 | 29.4 | 25.5 | 25.4 | 24.3 | 25.1 | 25.1 | 25.1 | 25.4 |
| 1995 | 24.8 | 26.6 | 28.9 | 29.6 | 29.5 | 26.7 | 25.6 | 25.6 | 24.6 | 25.3 | 25 | 22.5 |
| 1996 | 23.3 | 24.8 | 26.4 | 28.4 | 28.7 | 25.6 | 24.8 | 24.5 | 25.2 | 24.6 | 24.3 | 23.6 |
| 1997 | 22.9 | 25.9 | 26.8 | 27.2 | 29.2 | 27.4 | 25.8 | 25.8 | 25 | 24.3 | 24.5 | 23.1 |
| 1998 | 23.2 | 24.2 | 27.6 | 30.4 | 31.6 | 29.1 | 26.1 | 25.5 | 24.6 | 25.1 | 25.1 | 24.6 |
| 1999 | 24.7 | 25.8 | 27.9 | 29.3 | 29.9 | 26.7 | 25.1 | 25.1 | 25.8 | 24.7 | 24.7 | 24.3 |
| 2000 | 25.1 | 26.4 | 27.7 | 29.6 | 29 | 25.5 | 26.1 | 26.1 | 25.7 | 25.6 | 25.8 | 24.4 |
| 2001 | 23.9 | 25.9 | 26.3 | 28.9 | 27.7 | 24.7 | 24.7 | 25.2 | 24.5 | 24.2 | 24.9 | 24 |
| 2002 | 23.6 | 25.3 | 28.1 | 29.6 | 29.6 | 25.4 | 24.6 | 24.8 | 24.5 | 24.9 | 23.2 | 22.8 |
| 2003 | 23.9 | 25.4 | 27.5 | 29.6 | 30 | 24.9 | 24.5 | 24.3 | 24.2 | 24.1 | 24.8 | 23.4 |
| 2004 | 22.4 | 24.6 | 27.7 | 27.6 | 28 | 24 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 | 23.5 |
| 2005 | 23.8 | 25.4 | 26 | 29.8 | 29.3 | 29 | 24.6 | 25.3 | 25.3 | 25 | 25 | 24.5 |
| 2008 | 24.9 | 26.9 | 27.9 | 30.4 | 30.1 | 26.7 | 23.9 | 24.7 | 24.5 | 25 | 24.8 | 24.8 |
| 2009 | 25.3 | 26.7 | 28.4 | 30.2 | 29.2 | 27.3 | 25.6 | 25.5 | 24.4 | 25.5 | 25 | 23.3 |
| 2010 | 22 | 22.1 | 26.6 | 28.6 | 31.5 | 27.7 | 23.4 | 24.5 | 24.7 | 25.9 | 25.1 | 24.2 |
| 2011 | 25.2 | 25.9 | 28.4 | 30.5 | 31 | 26.9 | 24.1 | 24.7 | 25.1 | 25 | 25 | 24.5 |
| 2012 | 24 | 24.3 | 27.8 | 29.4 | 29.4 | 26.4 | 24 | 24 | 24.7 | 25.5 | 24.1 | 24.5 |
| 2013 | 24.3 | 27.2 | 27.2 | 29.9 | 30 | 26.2 | 24.7 | 24.4 | 23.9 | 24.5 | 25.3 | 25.1 |
| Promedio Normalizado | 24.1 | 25.4 | 27.3 | 29.1 | 29.5 | 26.8 | 24.7 | 24.7 | 24.8 | 25.1 | 25 | 24.2 |
| No. de años | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

Para comenzar a procesar los datos en el programa R, se creó una tabla de valores separados por coma (csv.) con la siguiente información:

Tabla 15. Atributos y su descripción de la base de datos

| <i>Variable</i> | <i>Descripción de la variable</i> |
|-----------------|--|
| Nestacion | Nombre de la estación |
| ID_estacion | Identificador de la estación |
| Latitud | Latitud a la que se localiza la estación en coordenadas UTM |
| Longitud | Longitud a la que se localiza la estación en coordenadas UTM |
| Altitud | Metros sobre el nivel del mar donde se localiza la estación |
| Mes | Nombre del mes |
| ID_Mes | Identificador del mes Ej. Ene=1, Feb=2, Mar=3 |
| TMIN | Promedio mensual de la temperatura mínima |
| TMAX | Promedio mensual de la temperatura máxima |
| PPT | Acumulación mensual de la precipitación |

3.3.6. Modelación de series de datos en R

Se realizó una prueba de colinealidad para observar si las variables que fueron empleadas son independientes y no están relacionadas entre sí, lo que nos ayuda a no sobre estimar los resultados. Para obtener el valor promedio tanto de temperatura mínima y máxima como de precipitación para cada mes, se empleó el paquete “lme4” (modelos mixtos longitudinales) (www.r-project.org), para describir la relación entre una variable de respuesta (dependiente) y una o varias variables explicativas (independiente) (Faraway, 2006).

Se utilizaron los promedios para poder estimar las condiciones climáticas en los meses en que se desarrolla cada uno de los cultivos, quedando los modelos para cada una de las variables climáticas de la siguiente manera:

Temperatura mínima: (tmin~latitud + longitud + altitud + mes+(id_mes|id_estacion))

Temperatura máxima: (tmax~latitud + longitud + altitud + mes+(id_mes|id_estacion))

Precipitación: (ppt~latitud + longitud + altitud + mes+(id_mes|id_estacion))

Donde:

- Variables dependientes: temperatura mínima (tmin), temperatura máxima (tmax) y precipitación (ppt).
- Variables independientes: latitud, longitud, altitud y mes.

Posteriormente, se empleó un análisis de la varianza (ANOVA) para obtener los grados de significancia de los resultados de las regresiones (Faraway, 2006).

3.3.7. Gradiente altitudinal mensual de la temperatura mínima y máxima

Para el cálculo del gradiente altitudinal se deben interpolar los datos promedios de temperatura que resultaron de las regresiones multivariadas, considerando el grado de correlación con la altitud apoyándose de un Modelo Digital de Elevación (MDE) a 15 metros por pixel (Fries *et al.*, 2012). Para esto, se calculó la temperatura determinada mediante la fórmula que se presenta a continuación:

$$T_{Det} = T_{mensual} + \left(\Gamma (Z_{Det} - Z_{estación}) \right)$$

Donde:

- T_{Det} = temperatura determinada
- $T_{mensual}$ = temperatura promedio mensual
- Γ =gradiente altitudinal (correlación entre la altitud y la temperatura mensual)
- Z_{Det} = altitud media del área de estudio (2,000 msnm)
- $Z_{estación}$ = Altitud de cada estación (msnm)

Con esto obtenemos los valores de la temperatura determinada de cada estación como si estuvieran a 2,000 msnm, que es el valor medio de nuestra área de estudio, inmediatamente estos valores se interpolaron mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW) de ArcMap. Después, a partir del valor del MDE y la correlación entre la altitud y la temperatura, a la interpolación se le aplica la siguiente fórmula con la herramienta de “raster calculator” en ArcMap para obtener el gradiente altitudinal:

$$T_{x,y} = T_{Det} + \left(\Gamma \left(Z^{DEM(x,y)} - Z_{Det} \right) \right)$$

Donde:

- $T_{(x,y)}$ = temperatura promedio mensual en un pixel

- T_{Det} =temperatura determinada

- Γ =gradiente altitudinal (correlación lineal entre la altitud y la temperatura mensual)

- Z^{DEM} = valores de altitud del MDE

- Z_{Det} = altitud media del área de estudio (2,000 msnm)

Por medio de esta ecuación calculó el gradiente altitudinal tomando como punto de referencia la temperatura de las estaciones como si estuvieran a los 2,000 msnm, porque la distribución de las estaciones climáticas en el área de estudio se localizan en la parte baja y alta, de esta forma y considerando la correlación entre la altitud y la temperatura mensual se pudo asignar los valores para cada pixel del MDE donde no existe información de temperatura (Fries *et al.*, 2012).

3.3.8. Gradiente altitudinal mensual de precipitación

Para la precipitación, solo se interpolaron los datos mensuales de cada estación por el método “Spline” debido por la poca o nula correlación entre la altitud y la distribución de la precipitación, arrojando valores de coeficiente de correlación lineal (r^2) menores de 0.3 en una escala de 0 a 1.

3.4. Modelos de distribución del uso potencial del suelo

3.4.1. Insumos cartográficos digitales

- Modelo Digital de Elevación a 15 metros por pixel
- Mapa raster de temperatura mínima (15 metros por pixel)
- Mapa raster de temperatura máxima (15 metros por pixel)
- Mapa raster de precipitación (15 metros por pixel)
- Mapa raster de edafología (15 metros por pixel)

- Mapa raster de la RBMM

Todos ellos se procesaron en los sistemas de información geográfica ArcMap 10.4 (Esri) y Dinamica EGO 3.0.17.

3.4.2. Modelo de Lógica Difusa (Fuzzy)

Para la elaboración de un modelo de la aptitud a las condiciones ambientales de los usos agrícolas se empleó un método de sobreposición de mapas multiclase. El cual, toma valores entre 0 y 1 (no apto o apto) indicando el grado de aptitud (Buenrostro *et al.*, 2005).

$$\mu = \frac{1}{1 + Ae^{-Bx}}$$

Donde

- μ = Valor difuso entre 0 y 1.
- A y B= Coeficientes que controlan el valor de los puntos de inflexión.

Los criterios que se utilizaron para la obtener la distribución de los usos agrícolas son: la temperatura mínima y máxima, la precipitación, el tipo de suelo y la pendiente (figura 16). A continuación, en la tabla 16 se describen los criterios empleados para el modelo.

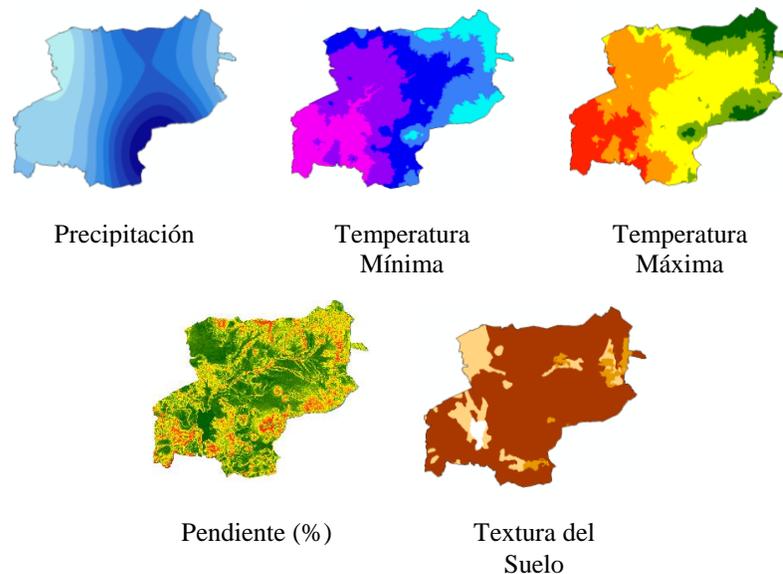


Figura 16. Mapas temáticos del municipio de Zitácuaro, Michoacán, empleados en el modelo de distribución.

Tabla 16. Valores de aptitud por cada variable para cada cultivo

| Cultivos | Crterios | Valores | Aptitud |
|-----------------------|--|--|---|
| Aguacate (Hass) | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 10°C y mayor a 33°C Entre 10°C y 17°C Entre 25°C y 33°C Entre 17°C y 25°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación anual | Menor de 700 y mayor de 1500 mm Entre 700 y 1000 mm Entre 1200 y 1500 mm Entre 1000 y 1200 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura ligera arcillosa o franco arcillosa Otros | Apto Moderadamente Apto |
| Guayaba (criolla) | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 15°C y mayor a 30°C Entre 15°C y 22°C Entre 28°C y 30°C Entre 22°C y 28°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación anual | Menor de 700 y mayor de 1500 mm Entre 700 y 1000 mm Entre 1200 y 1500 mm Entre 1000 y 1200 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura franco arcillosa= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| Durazno (amarillo) | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 4°C y mayor a 26°C Entre 4°C y 14°C Entre 23°C y 26°C Entre 14°C y 23°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación anual | Menor de 700 y mayor de 1500 mm Entre 700 y 1000 mm Entre 1200 y 1500 mm Entre 1000 y 1200 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |

| | | | |
|----------------------|--|--|---|
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura media= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| Zarzamora (brazo) | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 8°C y mayor a 32°C Entre 8°C y 17°C Entre 22°C y 32°C Entre 17°C y 22°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación anual | Menor de 700 y mayor de 1200 mm Entre 700 y 800 mm Entre 1100 y 1200 mm Entre 800 y 1100 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura franco-arenosa y franco arcillosa= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 10°C y mayor a 35°C Entre 10°C y 16°C Entre 26°C y 35°C Entre 16°C y 26°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| Maguey (Salmiana) | Precipitación anual | Menor de 600 y mayor de 1200 mm Entre 600 y 700 mm Entre 900 y 1200 mm Entre 700 y 900 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura franca y/o arcilloso= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 10°C y mayor a 33°C=0 Entre 10°C y 17°C=0.5 Entre 26°C y 33°C=0.5 Entre 17°C y 26°C=1 | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| Maíz (criollo) | | | |

| | | | |
|----------|-------------------------------------|--|---|
| | Precipitación de marzo-octubre | Menor de 700 y mayor de 1200 mm Entre 700 y 800 mm Entre 1100 y 1200 mm Entre 800 y 1100 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25%=0 Entre 15 y 25%=0.5 Entre 0 y 15%=1 | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura media= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| Trigo | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 3°C y mayor a 33°C Entre 3°C y 10°C Entre 26°C y 33°C Entre 10°C y 26°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación de junio-diciembre | Menor de 500 y mayor de 1200 mm Entre 500 y 600 mm Entre 900 y 1200 mm Entre 600 y 900 mm | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25%=0 Entre 15 y 25%=0.5 Entre 0 y 15%=1 | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura media= 1 Otros=0.5 | Apto Moderadamente Apto |
| Calabaza | Temperatura máxima y mínima mensual | Menor a 15°C y mayor a 30°C Entre 15°C y 19°C Entre 26°C y 30°C Entre 19°C y 26°C | No apto Moderadamente Apto Moderadamente Apto Apto |
| | Precipitación de marzo-junio | Menor de 300 y mayor de 450 mm=0.5 Entre 300 y 450 mm=1 | Moderadamente Apto Apto |
| | Pendiente | Más de 25% Entre 15 y 25% Entre 0 y 15% | No apto Moderadamente Apto Apto |
| | Suelo | Textura franca Otros | Apto Moderadamente Apto |

De acuerdo a los criterios descritos en la tabla anterior, se procedió a generar el modelo con el programa “Dinamica EGO” (<https://csr.ufmg.br/dinamica/>) mediante lógica difusa, en el cual, se asignaron los valores de los criterios en los puntos de inflexión. A continuación, se describe un ejemplo (figura 17) con valores de temperatura máxima para el cultivo de aguacate.

| Valores | Aptitud |
|----------------------------|--------------------|
| Menor a 10°C y mayor a 33° | No apto |
| Entre 10°C y 17°C | Moderadamente apto |
| Entre 25°C y 33°C | Moderadamente apto |
| Entre 17°C y 25°C | Apto |

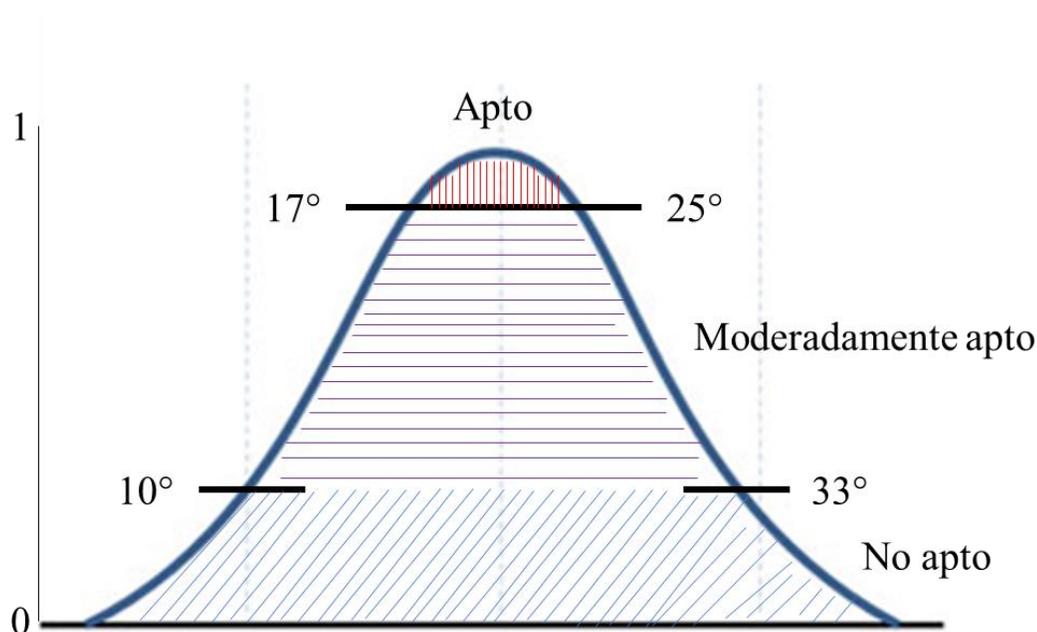


Figura 17. Curva de Gauss con los criterios de temperatura.

Se realizó esto con cada uno de los criterios para cada cultivo considerando las condiciones de los meses que transcurren desde la siembra hasta la cosecha, para el caso del aguacate que es un cultivo perenne, se tomaron en cuenta los doce meses del año. Cuando ya se tienen calculados los valores de los mapas, éstos se multiplican y se dividen entre el número de criterios para poder mostrar el mapa de aptitud.

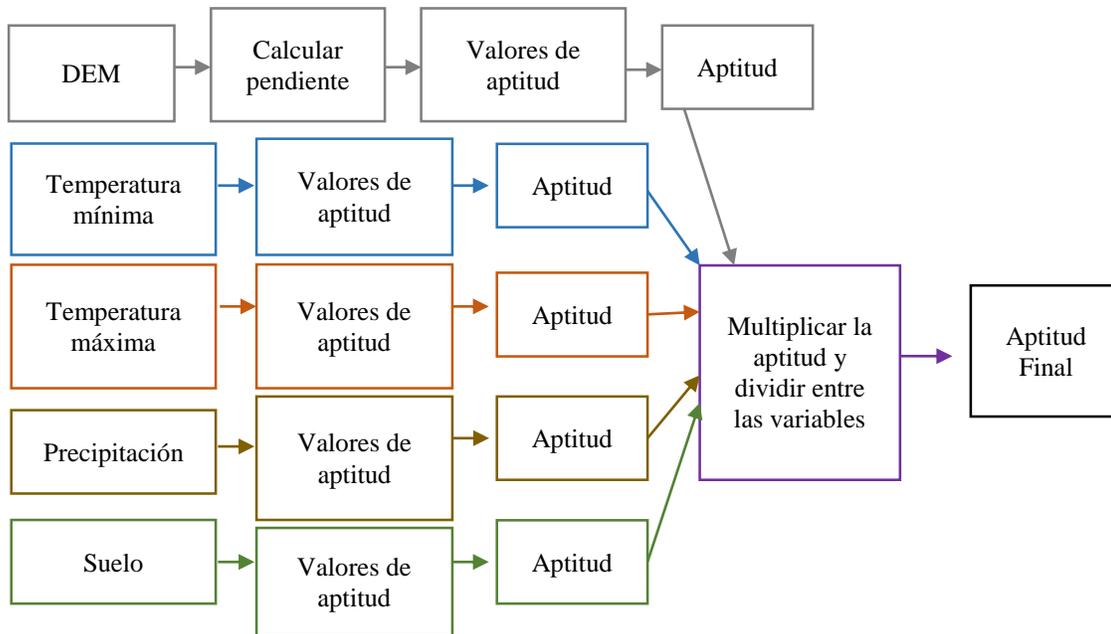


Figura 18. Diagrama de flujo para generar el mapa de aptitud.

Posteriormente, en ArcMap se realizó una reclasificación de los valores para obtener las clases: No apto, Moderadamente apto y Apto.

Tabla 17. Reclasificación de valores de aptitud climática

| <i>Clases</i> | <i>Rango</i> |
|--------------------|--------------|
| No apto | 0-0.5 |
| Moderadamente apto | 0.5-0.8 |
| Apto | 0.8-1 |

Cuando ya se tienen los valores reclasificados, se calculó la superficie en ha de cada cultivo y el porcentaje que ocupa en cada una de las clases de aptitud para poder describir la distribución de los cultivos de acuerdo a sus condiciones climáticas.

Capítulo 4: Resultados

4.1. Inventario de los usos agrícolas del suelo

En el municipio se localizan diferentes cubiertas y usos del suelo, entre los que se encuentran lo forestal (36%), agrícola (38%), urbano (3%), pastizal inducido (3%), matorral (12%), área sin vegetación aparente (6%) y cuerpos de agua (2%). Dentro de los usos agrícolas del suelo destacan las superficies con aguacate, maíz, guayaba y zarzamora (table 18 y figura 19).

Tabla 18. Superficie aproximada en hectáreas destinada a los diferentes usos agrícolas

| Usos del suelo agrícolas | Área en Hectáreas (Aprox.) | % superficie agrícola |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Aguacate | 7397.18 | 42.83 |
| Maíz | 7379.54 | 42.77 |
| Guayaba | 2203.67 | 12.77 |
| Zarzamora | 237.97 | 1.37 |
| Durazno | 27.43 | 0.16 |
| Pinos Ayacahuite | 24.29 | 0.14 |
| Trigo | 7.70 | 0.04 |
| Maguey | 2.68 | 0.015 |
| Calabaza | 0.43 | 0.002 |
| Total | 17,281 ha | 100% |

La temporada de siembra da inicio en marzo con cultivos herbáceos: calabaza y maíz, y se cosecha en junio y noviembre respectivamente. El trigo se siembra en julio y se cosecha entre noviembre-diciembre. La zarzamora cuenta con dos fechas de siembra y cosecha, la primera es la zarzamora conocida como “brazo” abarca de abril a agosto y la segunda “brasileña” de septiembre a febrero del siguiente año (tabla 19).

En las plantaciones frutícolas de guayaba, durazno y aguacate, se cosechan en los meses de febrero y marzo y los árboles se podan durante el mes de mayo. Con respecto al maguey, lo más recurrente es sembrarlo al mismo tiempo que el maíz, solo que tarda de 6 a 7 años para desarrollarse y estar en condiciones de obtener el aguamiel (tabla 19).

Tabla 19. Calendario de los usos del suelo agrícolas

| Cultivos | Calendario de cultivo | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
| Trigo | | | | | | S | | | | | C | C |
| Calabaza | | | S | | | C | | | | | | |
| Maíz | | | S | | | | | | | C | C | |
| Guayaba | | C | C | | P | | | | | | | |
| Aguacate | | C | C | | P | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|--|---|--|--|--|--|--|
| Durazno | | C | C | | P | | | | | | | |
| Zarzamora (brazo) | | | | S | | | C | | | | | |
| Zarzamora (brasileña) | C | | S | | | | | | | | | |
| Maguey | | | S | | | | | | | | | |

S: fecha de siembra; C: fecha de cosecha; P: fecha de poda de árboles

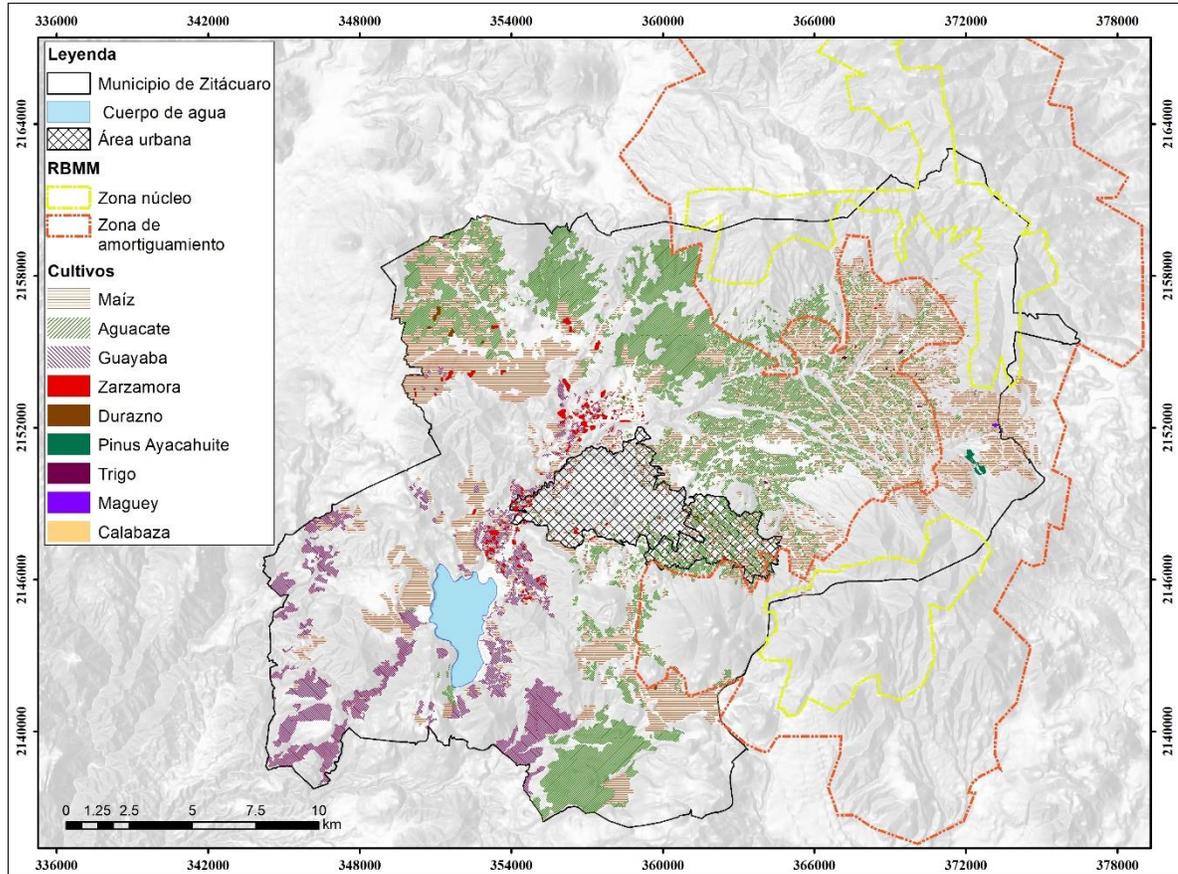


Figura 19. Usos del suelo agrícolas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán

4.2. Modelos de variación altitudinal de las variables meteorológicas

4.2.1. Regresiones multivariadas de la temperatura (mínima y máxima) y precipitación

Tanto la temperatura máxima y mínima como la precipitación no presenta colinealidad, por tal razón se puede aplicar la regresión con las variables independientes seleccionadas: latitud, longitud, altitud y mes (figura 20, 21 y 22).

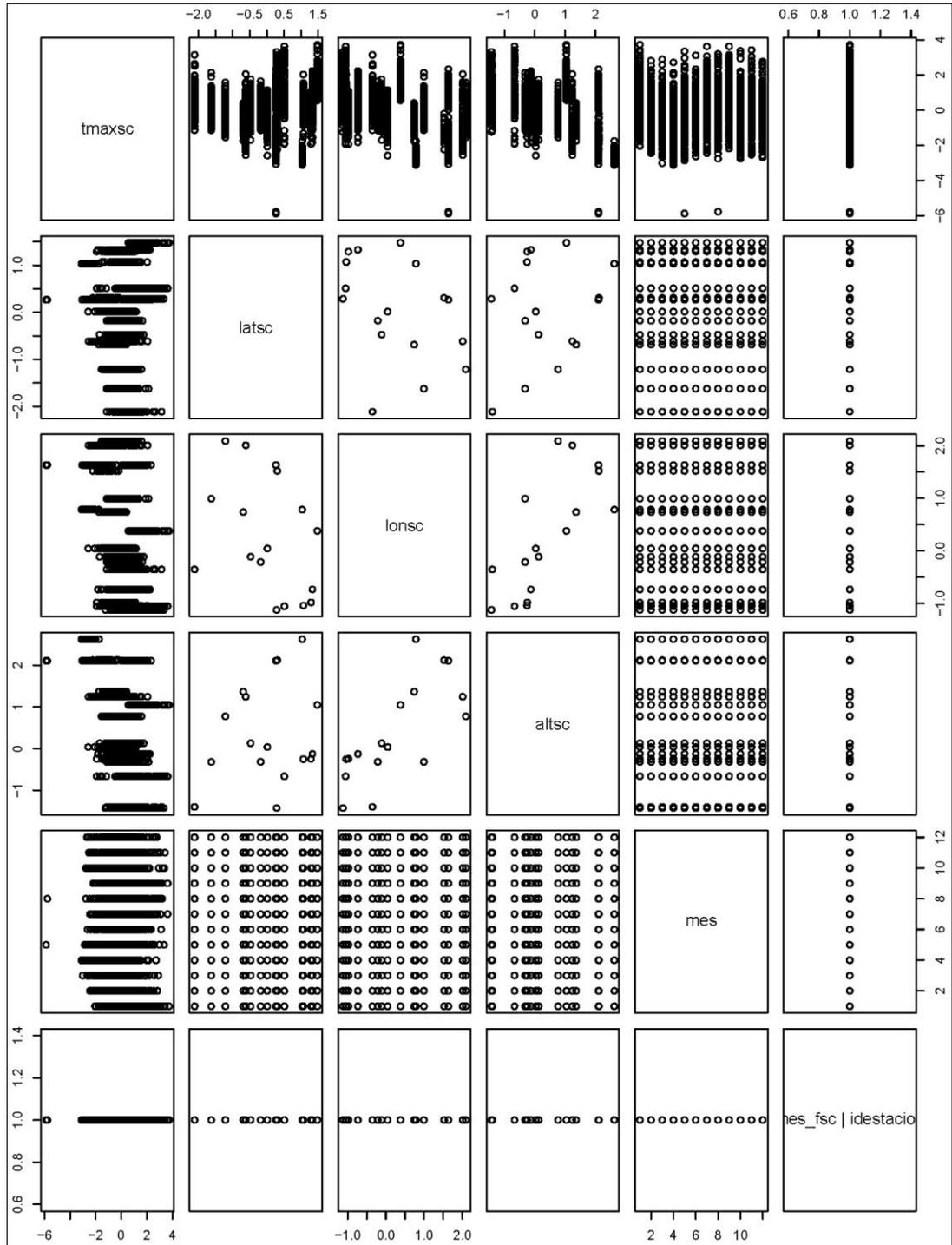


Figura 20. Modelo de temperatura máxima sin colinealidad entre sus variables.

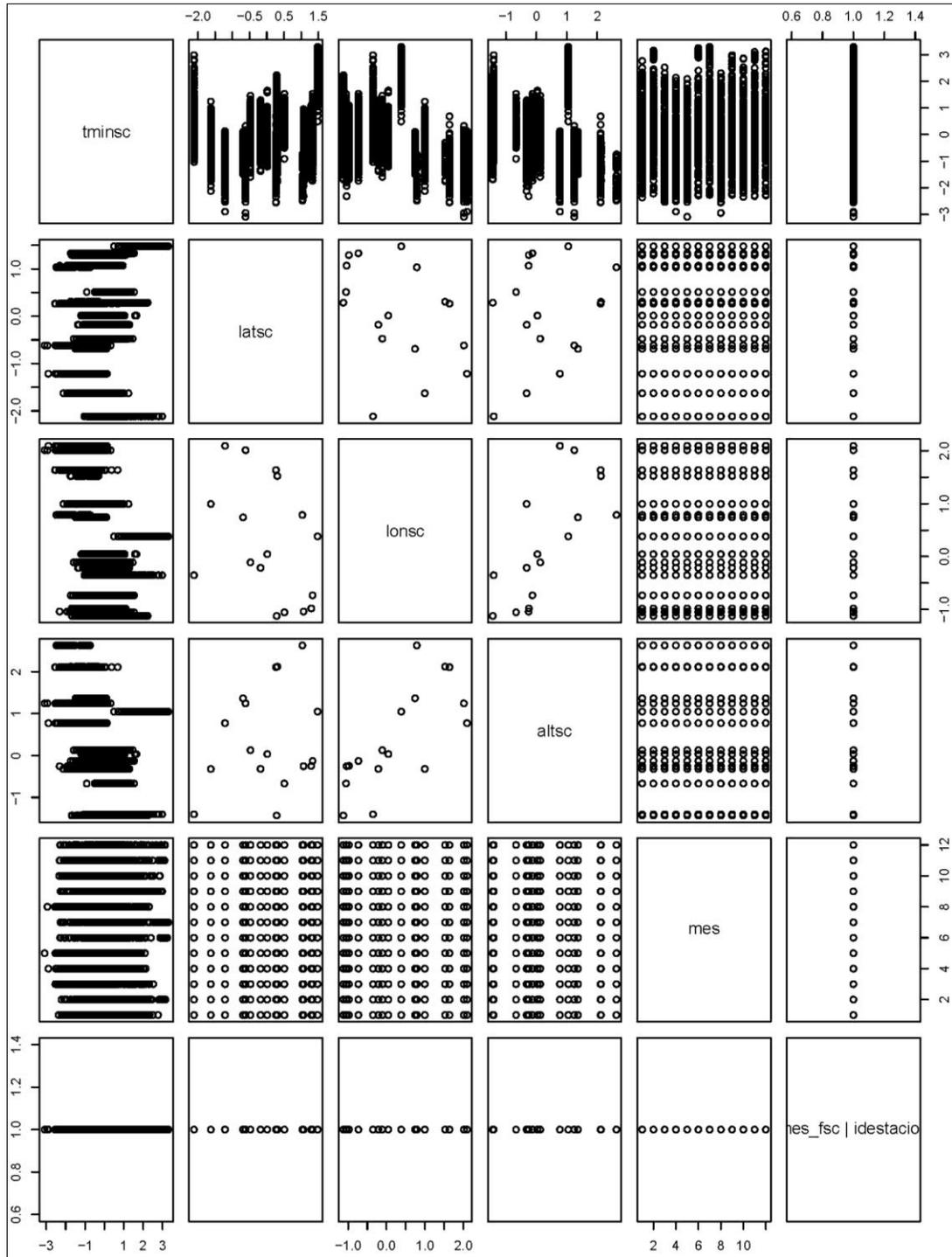


Figura 21. Modelo de temperatura mínima sin colinealidad entre sus variables.

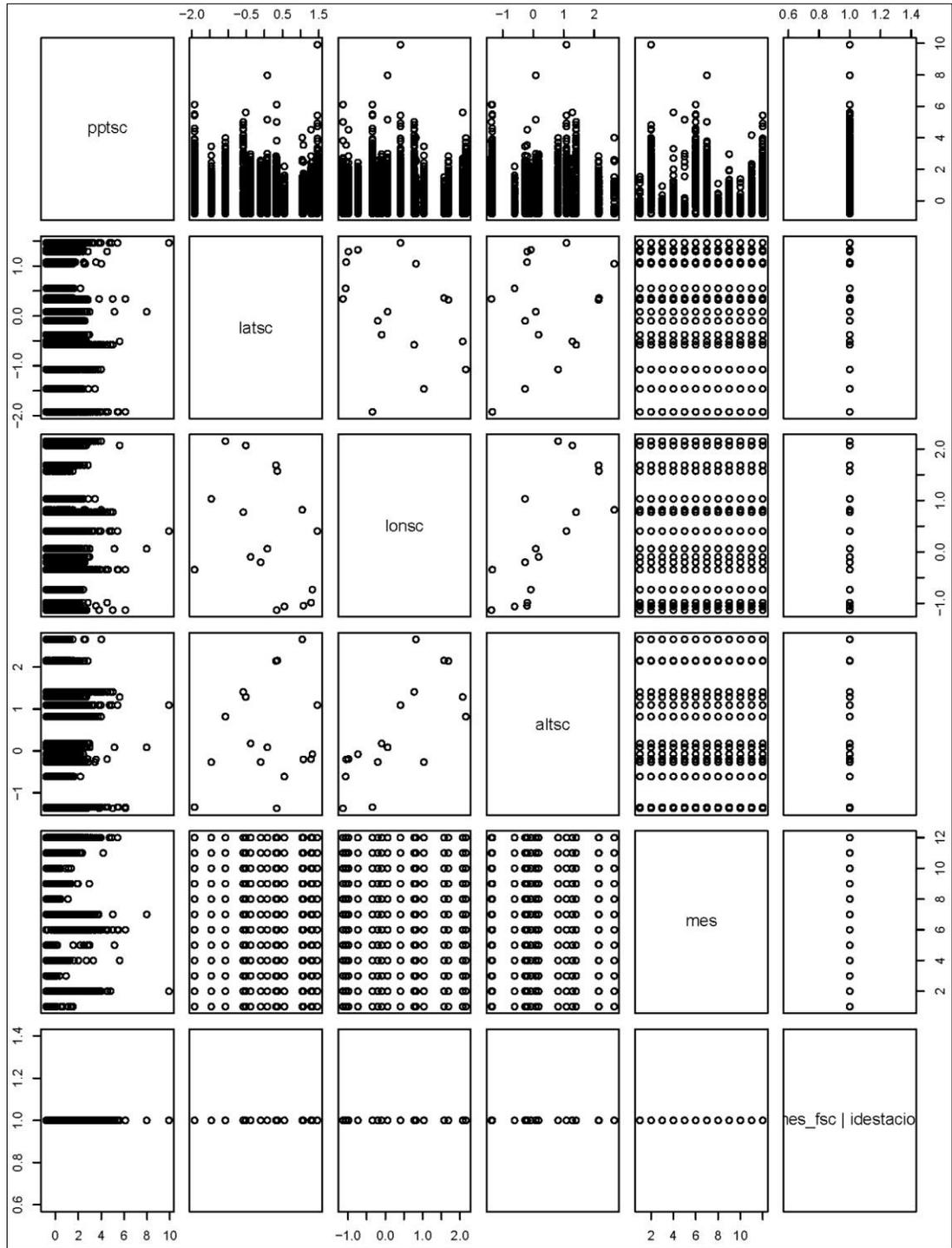


Figura 22. Modelo de precipitación sin colinealidad entre sus variables.

Para las series de datos de temperatura mínima se tiene un coeficiente de determinación (r^2) de 0.76, para la temperatura máxima de 0.6 y para la precipitación de 0.63, esto nos indica la proporción en que las variables independientes pueden describir el comportamiento de la variable dependiente. A continuación, se muestran los valores de significancia para cada coeficiente de determinación (tabla 20).

Tabla 20. Valores de significancia para el coeficiente de determinación.

| Regresión | r^2 | Valor de P |
|--------------------|-------|-------------|
| Temperatura mínima | 0.76 | P:<2e-16*** |
| Temperatura máxima | 0.6 | P:<2e-16*** |
| Precipitación | 0.63 | P:<2e-16*** |

Los promedios de las condiciones climáticas de cada mes del año, para cada una de las estaciones utilizadas, quedó de la siguiente manera:

Tabla 21. Promedio normalizado de la temperatura mínima mensual en cada estación meteorológica.

| Estación | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Monarca II | 1.2 | 1.7 | 2.9 | 4.5 | 6.2 | 7.0 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 5.8 | 4.2 | 2.9 |
| Lindero | 4.4 | 4.8 | 6.0 | 7.5 | 9.0 | 9.8 | 9.3 | 9.2 | 9.2 | 8.3 | 6.6 | 5.2 |
| Cuesta del Carmen | 3.6 | 3.9 | 4.9 | 6.3 | 7.7 | 8.3 | 7.7 | 7.5 | 7.4 | 6.3 | 4.5 | 2.9 |
| Macheros | 5.9 | 6.3 | 7.4 | 8.9 | 10.4 | 11.1 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 9.4 | 7.7 | 6.2 |
| San Pablo Malacatepec | 1.7 | 2.2 | 3.3 | 4.9 | 6.4 | 7.2 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 5.8 | 4.1 | 2.7 |
| Asunción Donato Guerra | 3.4 | 3.9 | 5.1 | 6.7 | 8.4 | 9.2 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 8.0 | 6.4 | 5.1 |
| Presa El Bosque (CFE) | 9.1 | 9.6 | 10.7 | 12.2 | 13.8 | 14.5 | 14.0 | 13.9 | 13.9 | 13.0 | 11.3 | 9.9 |
| Zitácuaro | 8.8 | 9.1 | 10.1 | 11.6 | 13.1 | 13.7 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 11.9 | 10.1 | 8.6 |
| Tuxpan | 7.9 | 8.4 | 9.6 | 11.2 | 12.8 | 13.6 | 13.1 | 13.1 | 13.1 | 12.3 | 10.6 | 9.2 |
| Presa Tuxpan (CFE) | 7.0 | 7.6 | 8.8 | 10.5 | 12.1 | 13.0 | 12.6 | 12.6 | 12.7 | 11.9 | 10.3 | 9.0 |
| Presa Tuxpan | 6.2 | 6.7 | 8.0 | 9.7 | 11.4 | 12.3 | 11.9 | 12.0 | 12.1 | 11.3 | 9.8 | 8.5 |
| La Encarnación | 8.8 | 9.3 | 10.3 | 11.8 | 13.4 | 14.1 | 13.5 | 13.4 | 13.4 | 12.5 | 10.7 | 9.3 |
| Ixtapan del Oro | 6.6 | 7.1 | 8.3 | 9.9 | 11.5 | 12.3 | 11.9 | 11.9 | 12.0 | 11.1 | 9.5 | 8.1 |
| San José Purua | 10.1 | 10.5 | 11.5 | 13.0 | 14.5 | 15.2 | 14.6 | 14.5 | 14.4 | 13.4 | 11.7 | 10.2 |
| Susupuato de Guerrero | 9.7 | 10.0 | 11.0 | 12.4 | 13.8 | 14.5 | 13.8 | 13.6 | 13.5 | 12.4 | 10.6 | 9.1 |
| Jungapeo | 11.4 | 11.8 | 12.9 | 14.4 | 15.9 | 16.6 | 16.0 | 15.9 | 15.9 | 14.9 | 13.2 | 11.7 |

Tabla 22. Promedio normalizado de la temperatura máxima mensual en cada estación meteorológica.

| Estación | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Monarca II | 14.7 | 16.0 | 17.8 | 19.6 | 19.7 | 17.2 | 15.6 | 15.7 | 15.5 | 15.8 | 15.6 | 15.0 |
| Lindero | 18.8 | 20.1 | 22.0 | 23.8 | 23.9 | 21.4 | 19.8 | 20.0 | 19.8 | 20.2 | 20.0 | 19.4 |
| Cuesta del Carmen | 21.4 | 22.8 | 24.7 | 26.7 | 26.9 | 24.4 | 22.9 | 23.2 | 23.2 | 23.6 | 23.5 | 22.9 |
| Macheros | 21.2 | 22.5 | 24.3 | 26.2 | 26.3 | 23.7 | 22.1 | 22.3 | 22.1 | 22.5 | 22.3 | 21.6 |
| San Pablo Malacatepec | 19.8 | 21.2 | 23.0 | 24.9 | 25.1 | 22.6 | 21.1 | 21.3 | 21.2 | 21.6 | 21.5 | 20.9 |
| Asunción Donato Guerra | 23.2 | 24.6 | 26.4 | 28.2 | 28.4 | 25.8 | 24.2 | 24.4 | 24.2 | 24.6 | 24.4 | 23.7 |
| Presa El Bosque (CFE) | 23.6 | 24.9 | 26.6 | 28.3 | 28.4 | 25.7 | 24.1 | 24.1 | 23.9 | 24.2 | 23.9 | 23.2 |
| Zitácuaro | 22.2 | 23.4 | 25.1 | 26.9 | 26.9 | 24.2 | 22.5 | 22.6 | 22.3 | 22.6 | 22.3 | 21.5 |
| Tuxpan | 25.1 | 26.4 | 28.2 | 30.1 | 30.3 | 27.7 | 26.1 | 26.3 | 26.2 | 26.5 | 26.4 | 25.7 |
| Presa Tuxpan (CFE) | 23.5 | 24.8 | 26.6 | 28.4 | 28.5 | 25.9 | 24.3 | 24.4 | 24.3 | 24.6 | 24.4 | 23.7 |
| Presa Tuxpan | 24.4 | 25.7 | 27.5 | 29.3 | 29.4 | 26.8 | 25.2 | 25.3 | 25.2 | 25.5 | 25.3 | 24.6 |
| La Encarnación | 24.2 | 25.5 | 27.3 | 29.1 | 29.2 | 26.5 | 24.9 | 25.0 | 24.9 | 25.2 | 24.9 | 24.2 |
| Ixtapan del Oro | 24.2 | 25.5 | 27.2 | 29.0 | 29.1 | 26.5 | 24.9 | 25.0 | 24.8 | 25.1 | 24.9 | 24.2 |
| San José Purua | 27.5 | 28.9 | 30.8 | 32.7 | 32.9 | 30.3 | 28.8 | 29.0 | 28.9 | 29.3 | 29.2 | 28.6 |
| Susupuato de Guerrero | 26.7 | 28.0 | 29.7 | 31.5 | 31.6 | 29.0 | 27.4 | 27.5 | 27.3 | 27.6 | 27.4 | 26.7 |
| Jungapeo | 28.1 | 29.3 | 31.0 | 32.8 | 32.8 | 30.2 | 28.5 | 28.6 | 28.4 | 28.6 | 28.3 | 27.6 |

Tabla 23. Promedio normalizado de la precipitación acumulada mensual en cada estación meteorológica.

| Estación | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Monarca II | 35 | 27 | 24 | 29 | 68 | 190 | 222 | 209 | 188 | 108 | 48 | 40 |
| Lindero | 27 | 16 | 11 | 13 | 50 | 169 | 199 | 183 | 160 | 77 | 15 | 4 |
| Cuesta del Carmen | 26 | 14 | 9 | 10 | 47 | 165 | 194 | 178 | 154 | 71 | 8 | 0 |
| Macheros | 44 | 40 | 42 | 51 | 94 | 221 | 257 | 248 | 232 | 156 | 100 | 96 |
| San Pablo Malacatepec | 25 | 14 | 10 | 13 | 50 | 170 | 201 | 185 | 163 | 81 | 19 | 9 |
| Asunción Donato Guerra | 30 | 22 | 21 | 27 | 67 | 190 | 223 | 211 | 191 | 112 | 53 | 46 |
| Presa El Bosque (CFE) | 24 | 13 | 8 | 11 | 48 | 168 | 197 | 182 | 159 | 77 | 14 | 4 |
| Zitácuaro | 22 | 12 | 9 | 12 | 50 | 171 | 201 | 187 | 165 | 83 | 22 | 12 |
| Tuxpan | 17 | 6 | 2 | 5 | 42 | 162 | 192 | 177 | 154 | 72 | 10 | 0 |
| Presa Tuxpan (CFE) | 18 | 7 | 3 | 6 | 44 | 164 | 194 | 179 | 157 | 75 | 14 | 4 |
| Presa Tuxpan | 15 | 3 | 0 | 0 | 35 | 154 | 182 | 166 | 142 | 58 | 0 | 0 |
| La Encarnación | 19 | 8 | 3 | 5 | 42 | 161 | 191 | 175 | 152 | 69 | 7 | 0 |
| Ixtapan del Oro | 23 | 12 | 9 | 12 | 49 | 170 | 200 | 185 | 163 | 81 | 19 | 9 |
| San José Purua | 13 | 0 | 0 | 0 | 30 | 148 | 175 | 158 | 133 | 49 | 0 | 0 |
| Susupuato de Guerrero | 25 | 16 | 13 | 17 | 56 | 177 | 209 | 195 | 174 | 93 | 32 | 23.8 |
| Jungapeo | 13 | 2 | 0 | 0 | 38 | 158 | 187 | 172 | 149 | 67 | 5 | 0.0 |

Para la temperatura mínima los meses más fríos del año son noviembre, diciembre, enero y febrero, mientras que para la temperatura máxima los más cálidos son de marzo a octubre. Por último, las lluvias tienen presencia durante los meses de mayo a octubre.

4.2.2. Gradiente altitudinal mensual de la temperatura

La correlación que existe entre la altitud y la temperatura (mínima y máxima) promedio mensual en el municipio de Zitácuaro es inversa (anexo 2 y 3). En la temperatura mínima conforme la altitud aumenta la temperatura disminuye y, en la temperatura máxima mientras la altitud disminuye la temperatura aumenta. Con una oscilación térmica de 15°C promedio en el área de estudio, la cual se percibe más en los meses de invierno.

Tabla 24. Correlación mensual entre la temperatura y la altitud.

| <i>Mes</i> | <i>Correlación entre la temperatura máxima y la altitud</i> | <i>Correlación entre la temperatura mínima y la altitud</i> |
|------------|---|---|
| Enero | 0.84 | 0.74 |
| Febrero | 0.83 | 0.75 |
| Marzo | 0.82 | 0.76 |
| Abril | 0.81 | 0.77 |
| Mayo | 0.80 | 0.77 |
| Junio | 0.79 | 0.78 |
| Julio | 0.78 | 0.79 |
| Agosto | 0.77 | 0.79 |
| Septiembre | 0.77 | 0.79 |
| Octubre | 0.75 | 0.80 |
| Noviembre | 0.73 | 0.80 |
| Diciembre | 0.72 | 0.80 |

4.2.3. Gradiente altitudinal mensual de la precipitación

La precipitación tiene poca o nula correlación con la altitud (tabla 25 y anexo 4) a diferencia de la temperatura, debido a que la distribución espacial de los eventos de precipitación puede estar condicionado por más factores además del relieve que causan su variabilidad en el espacio, tales como: las masas de aire, su proximidad al mar, entre otros.

Tabla 25. *Correlación mensual entre la precipitación y la altitud.*

| <i>Mes</i> | <i>Correlación entre la precipitación y la altitud</i> |
|------------|--|
| Enero | 0.45 |
| Febrero | 0.38 |
| Marzo | 0.31 |
| Abril | 0.28 |
| Mayo | 0.25 |
| Junio | 0.22 |
| Julio | 0.20 |
| Agosto | 0.19 |
| Septiembre | 0.18 |
| Octubre | 0.17 |
| Noviembre | 0.15 |
| Diciembre | 0.12 |

4.2.4. Caracterización climática anual

El municipio presenta una temperatura mínima promedio anual que va desde 1°C hasta los 15 °C, las temperaturas por debajo de los 10°C se localizan hacia la parte noreste del municipio por encima de los 2,400 msnm, mientras que conforme se desciende en altitud a partir de los 2,000 msnm la temperatura aumenta. Con respecto a la temperatura máxima promedio anual los valores oscilan entre los 15°C hasta 30°C, con las temperaturas más cálidas al suroeste del municipio por debajo de los 2,000 msnm.

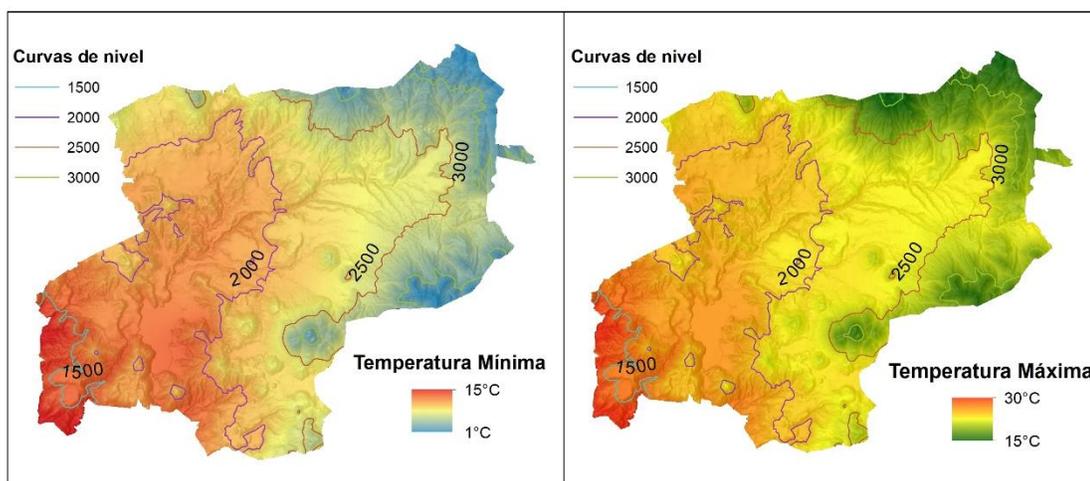


Figura 23. Temperatura mínima y máxima promedio anual.

La precipitación anual en el municipio va desde los 600 mm hasta poco más de los 1,500 mm (figura 24). De las 16 estaciones meteorológicas que se utilizaron, el porcentaje de lluvia anual que registra cada estación entre los meses de mayo a octubre es de 85% y 90% y, el 15% restante se distribuye entre los meses de noviembre a abril.

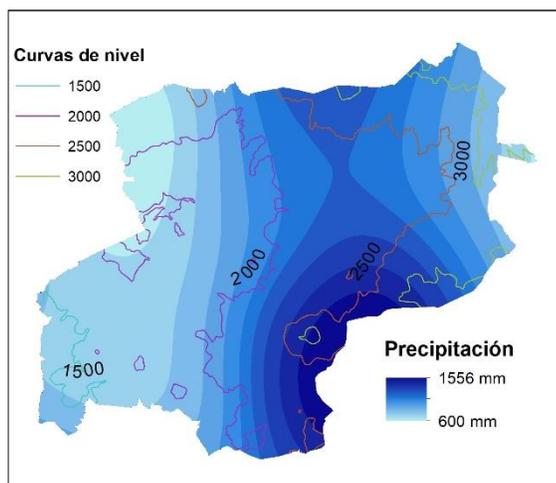


Figura 24. Precipitación promedio anual.

4.3. Modelos de aptitud de los usos agrícolas del suelo

En los modelos de distribución para cada uno de los cultivos, los valores se encuentran entre 0 y 1, esto permite tener un suavizado entre las clases de aptitud y que no sea un cambio abrupto. Los valores de aptitud para cada uno de los cultivos se muestran en seguida:

Tabla 26. Valores de aptitud climática de los cultivos dentro del municipio de Zitácuaro.

| Cultivos | Valores de Aptitud |
|-----------------|---------------------------|
| Aguacate | 0.3 - 0.84 |
| Maíz | 0.3 - 0.9 |
| Guayaba | 0.29 - 0.8 |
| Zarzamora | 0.29 - 0.85 |
| Durazno | 0.30 - 0.95 |
| Trigo | 0.49 - 1 |
| Maguey | 0.3 - 0.91 |
| Calabaza | 0.3 - 0.8 |

Lo descrito en la tabla 26, nos indica los valores de aptitud que existe en el municipio de Zitácuaro para cada cultivo. Por ejemplo, para el caso del aguacate hay pixeles con un rango de aptitud desde los 0.3 a los 0.84.

A partir de los valores de aptitud se realizó una reclasificación de los valores para asignar la clase de aptitud climática, quedando de la siguiente manera: la clase no apta con valores entre 0-0.5, clase moderadamente apta entre 0.5-0.8 y clase apta entre 0.8-1 (Salvatore *et al.*, 2010).

A continuación, se muestran los modelos de distribución de uso de suelo (figura 25 a 32) de acuerdo a la aptitud climática. En cada uno de ellos el mapa del lado izquierdo indica la aptitud ambiental con valores entre 0 y 1, mientras que el mapa de la derecha representa la distribución de los cultivos en clases no aptas, moderadamente aptas y aptas.

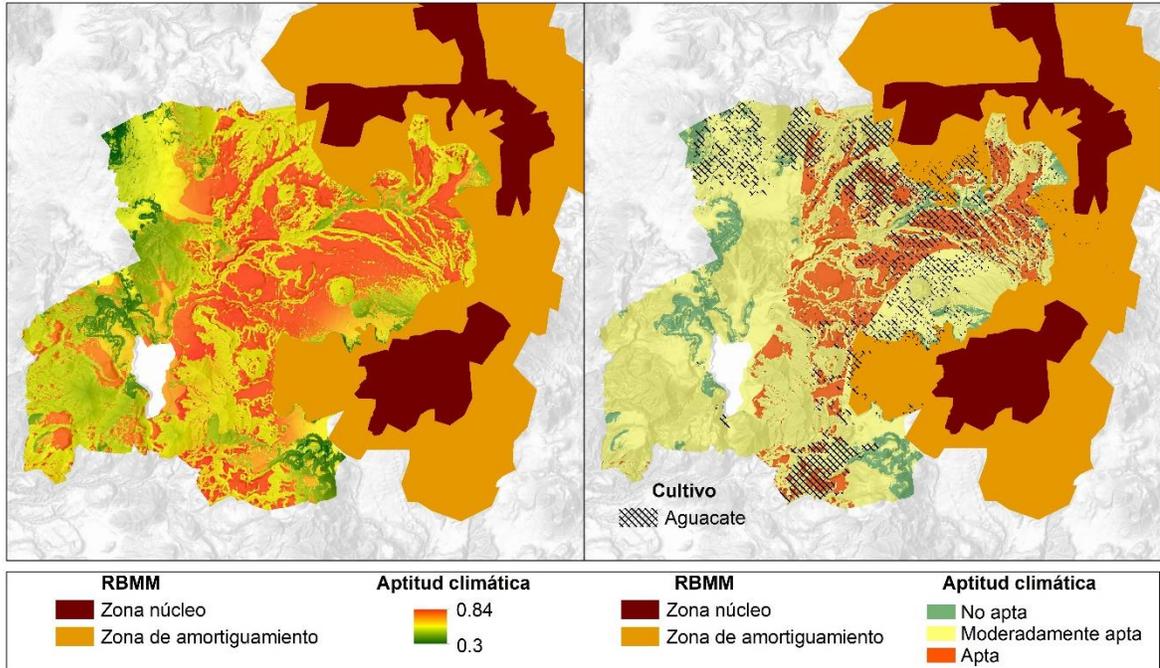


Figura 25. Aptitud para el cultivo de Aguacate a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

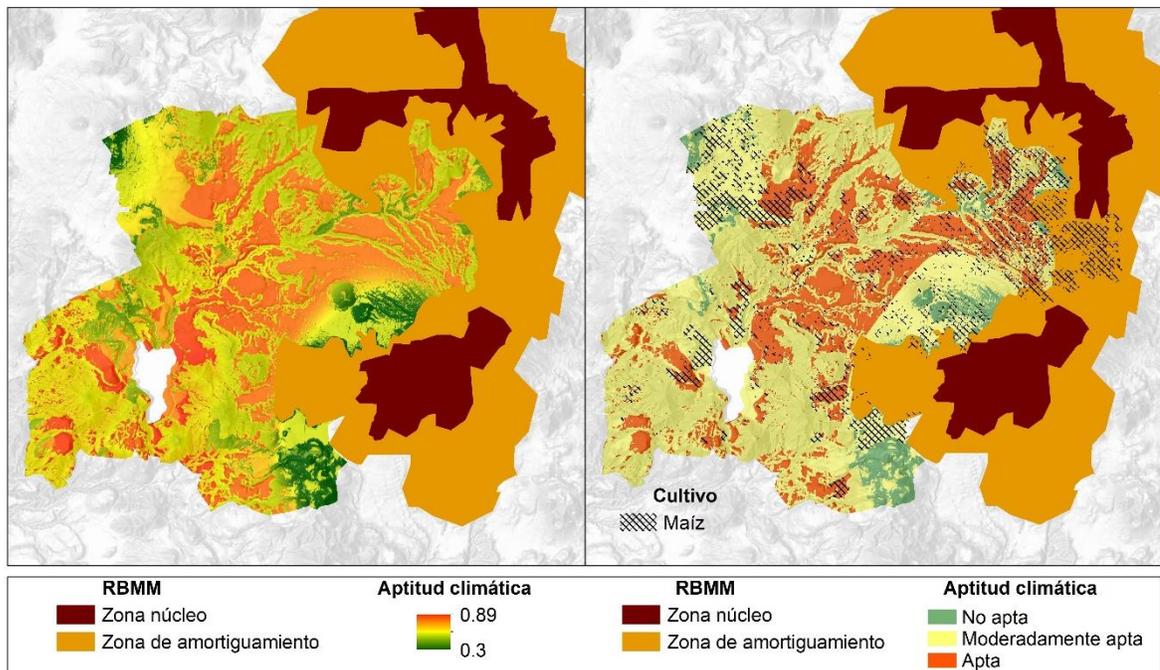


Figura 26. Aptitud para el cultivo de Maíz a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

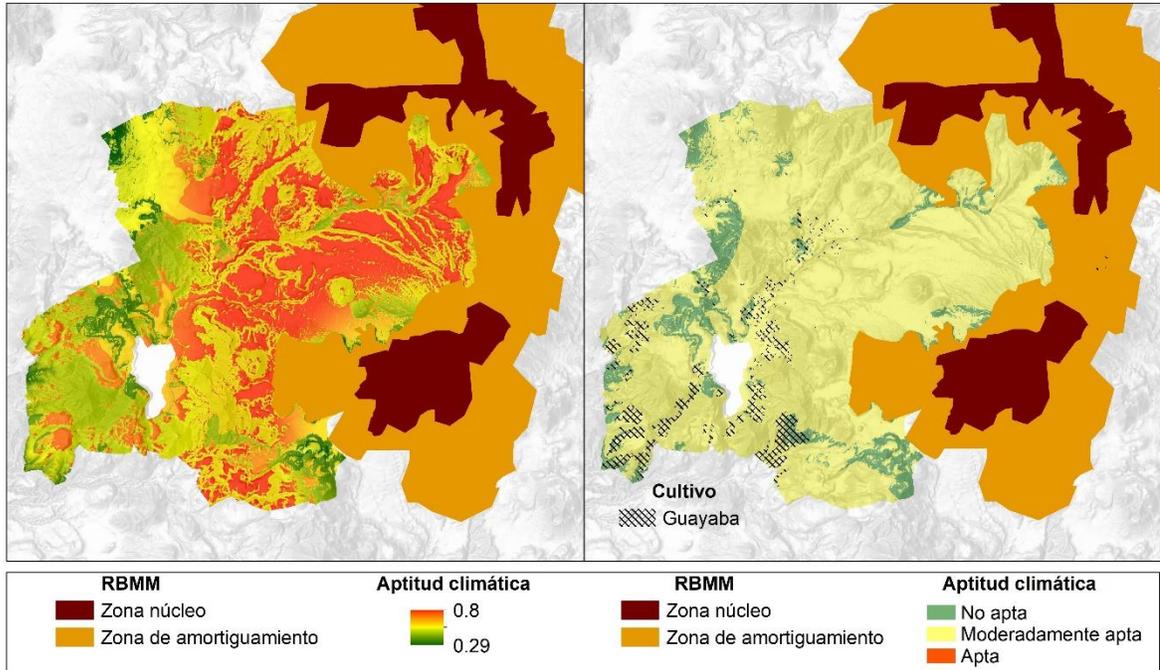


Figura 27. Aptitud para el cultivo de Guayaba a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

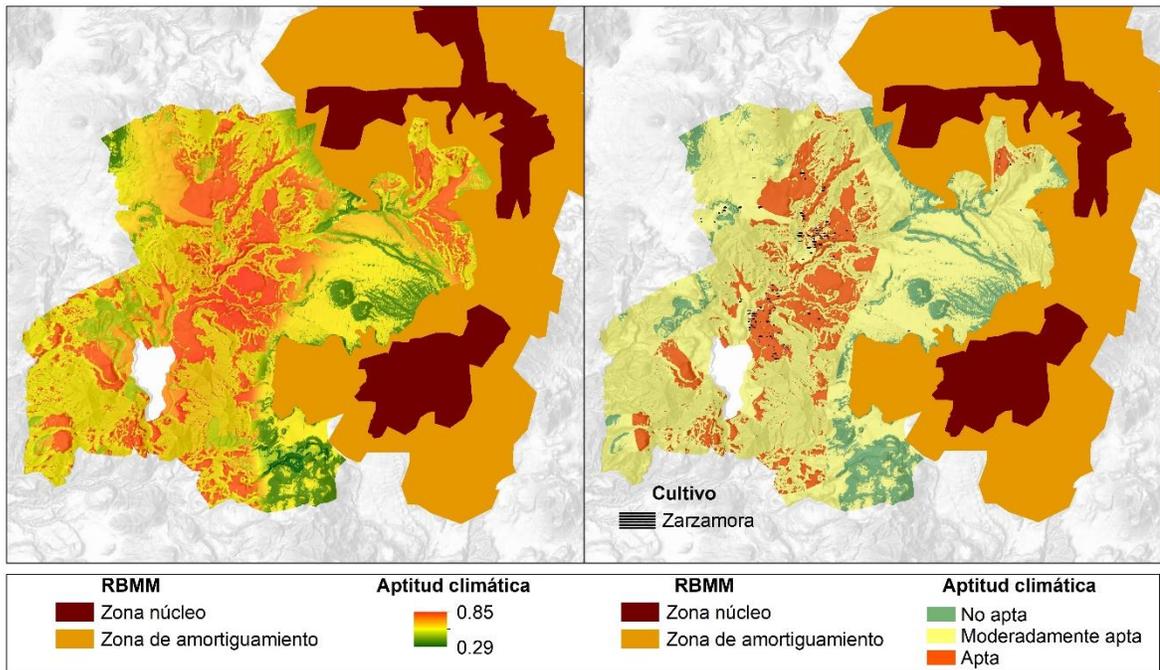


Figura 28. Aptitud para el cultivo de Zarzamora a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

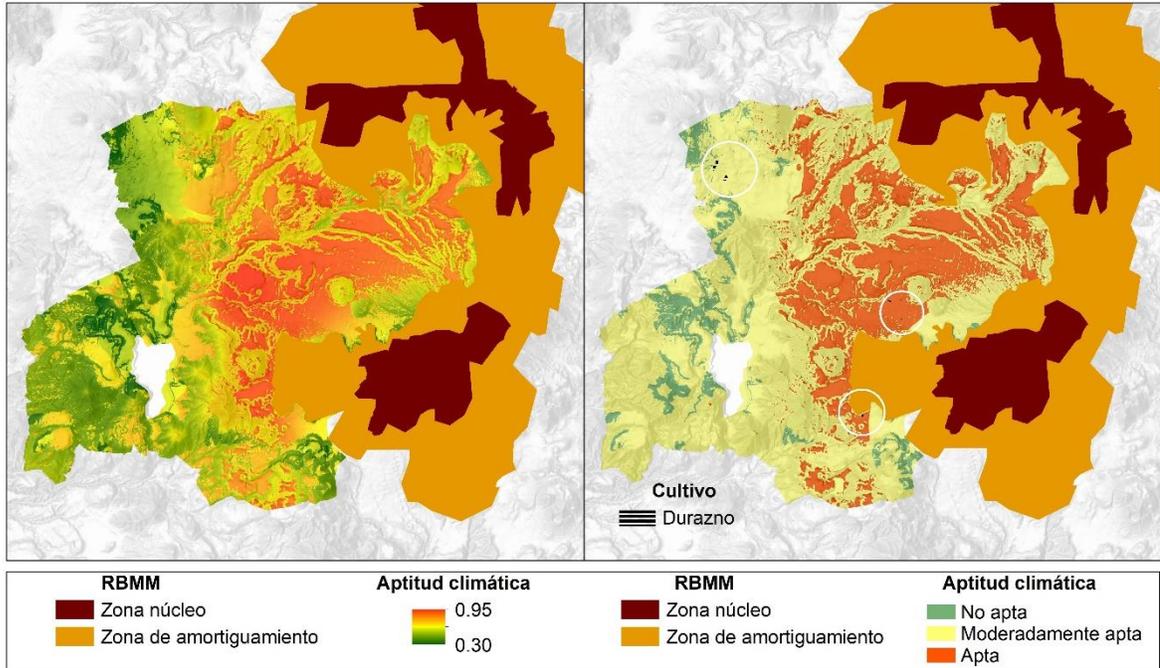


Figura 29. Aptitud para el cultivo de Durazno a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

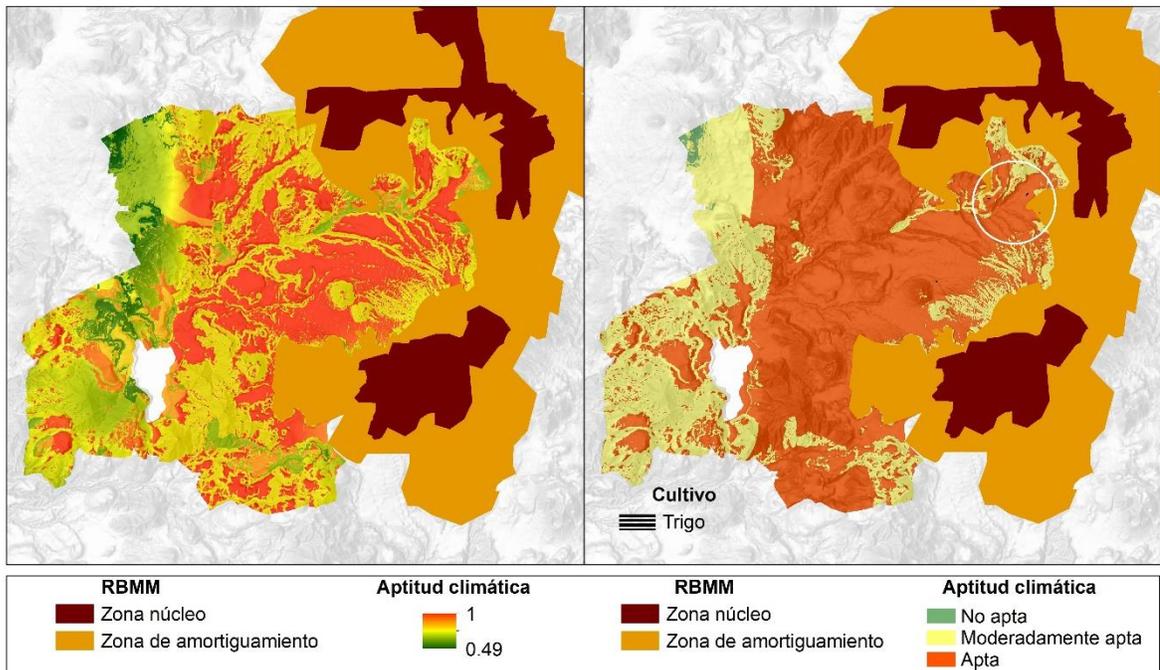


Figura 30. Aptitud para el cultivo de Trigo a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

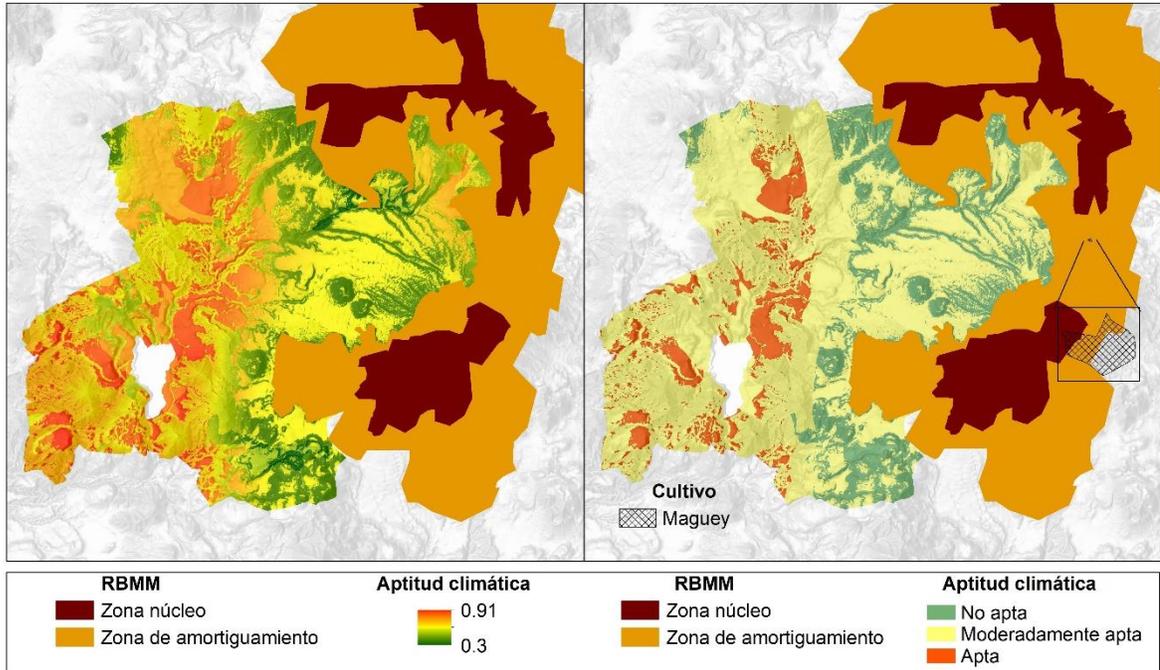


Figura 31. Aptitud para el cultivo de Maguey a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

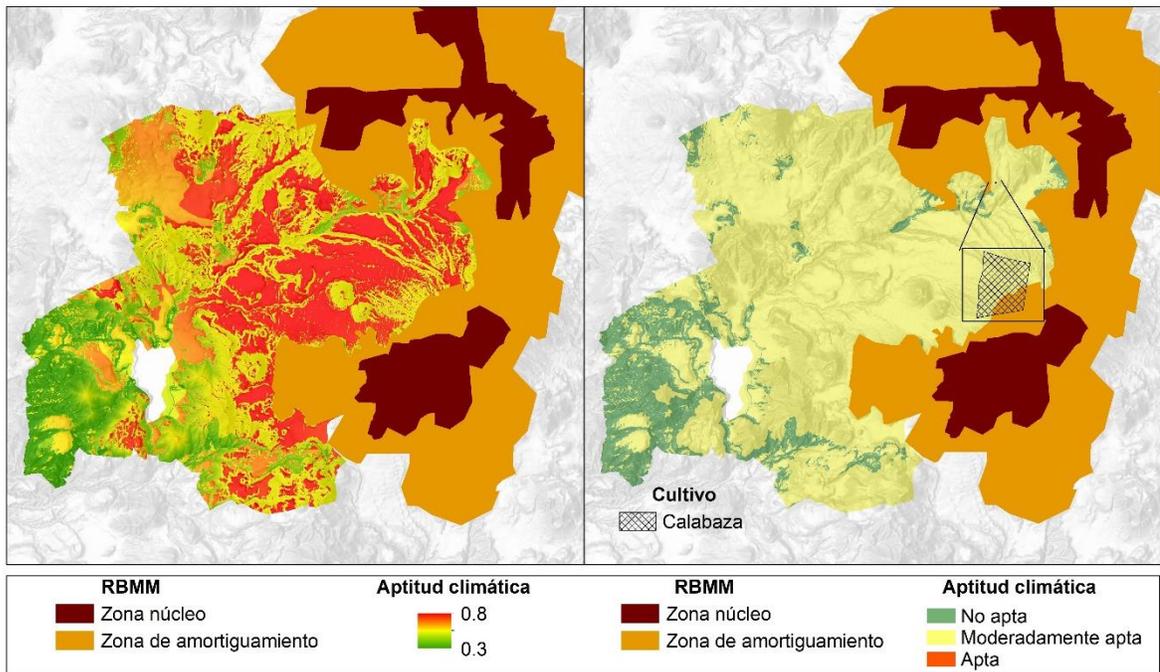


Figura 32. Aptitud para el cultivo de Calabaza a las condiciones climáticas. Del lado izquierdo la aptitud y del lado derecho la categorización. El achurado se refiere a las zonas de cultivo actual.

De las 7,397 ha de superficie con las que cuenta el aguacate, 29% (2,143 ha) se encuentran en zona apta para su establecimiento, la cual se localiza entre los 2,000 y los 2,400 msnm. Esta zona también es apta para las plantaciones de durazno, pero al tener un umbral más resistente a las temperaturas bajas puede ascender a poco más de los 2,500 msnm. Respecto a extensión, el durazno cuenta con 28 ha de las cuales el 33% (9.1 ha) están en zonas aptas.

Para la zarzamora (238 ha) y el maguey (2.68 ha), la zona apta para su establecimiento abarca entre los 1,500 y los 2,000 msnm. El 89% (128 ha) de la zarzamora, se establecen en zona apta, mientras que el maguey no cuenta con parcelas dentro de zona apta, pero si en zona moderadamente apta con el 51% (1.36 ha).

En lo que corresponde a los cultivos del maíz (7,379 ha) y el trigo (7.7 ha), al ser los que presentan el mayor umbral térmico y de precipitación, su zona apta oscila entre los 1,500 y los 2,400 msnm. El maíz y el trigo cuentan con el 31% (2,295 ha) y el 89% (6.8 ha) respectivamente en zona apta.

Por último, para la guayaba y la calabaza no hay zona apta para su establecimiento. Para el primero, de las 2,203 ha el 85% (1,878 ha) se encuentra en zona moderadamente apta, mientras que, para el segundo, su extensión de 0.43 ha se presenta en moderadamente apta.

En resumen, la distribución superficial de las parcelas de cada cultivo en las diferentes clases de aptitud ambiental queda de la siguiente manera.

Tabla 27. Distribución de la superficie en hectáreas de cada cultivo en relación a su aptitud ambiental.

| Cultivo | Superficie total (ha) | Superficie no apta (ha) | Superficie moderadamente apta (ha) | Superficie apta (ha) |
|----------------|------------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|
| Aguacate | 7,397.18 | 440.75 (6%) | 4,804.61 (65%) | 2,143.71 (29%) |
| Maíz | 7,379.54 | 637.73 (9%) | 4,421.24 (60%) | 2,295.13 (31%) |
| Guayaba | 2,203.67 | 325.15 (15%) | 1,878.52 (85%) | |
| Zarzamora | 237.97 | 1.24 (1%) | 108.67 (45%) | 128.04 (54%) |
| Durazno | 27.43 | 0.73 (3%) | 17.54 (64%) | 9.16 (33%) |
| Trigo | 7.70 | | 0.84 (11%) | 6.86 (89%) |
| Maguey | 2.68 | 1.32 (49%) | 1.36 (51%) | |
| Calabaza | 0.43 | | 0.43 (100%) | |
| Total | 17,256 | 1,406 (8%) | 11,233 (65%) | 4,582 (27%) |

En general, tomando en cuenta la superficie total de 17,256 ha que es la suma de todas las parcelas de los diferentes cultivos, tenemos que únicamente 4,582 ha (27%) se encuentra

establecida en zona apta, mientras que en la zona moderadamente apta se encuentra la mayor superficie de los cultivos con 11,233 ha (65%), y, por último, 1,406 ha (8%) en zonas no apta para su desarrollo.

Capítulo 5: Discusión

Modelo de aptitud climática, suelo y relieve para los usos agrícolas del suelo

Las variables utilizadas para el modelo de uso potencial del suelo con base en la aptitud climática en el municipio de Zitácuaro se consideran aceptables, dado que las regresiones de los datos climáticos tomando como variables independientes la latitud, longitud, altitud y el mes, muestran valores altos de significancia para cada coeficiente de determinación con lo que explica en buena proporción el comportamiento de la temperatura y precipitación (Faraway, 2006; Molina y Reyes, 2009; Leal *et al.*, 2010; Salvatore *et al.*, 2010).

Las variables de textura de suelo y pendiente complementaron en buena medida la correspondencia de los cultivos con las condiciones del territorio, lo cual se aprecia cuando se sobrepone el resultado del modelo con la distribución actual de los cultivos (Aguilar *et al.*, 2010; Espejel *et al.*, 2015).

Varios autores concuerdan que la correlación entre la altitud y la temperatura en zonas de montaña es notoria, a diferencia de la correlación entre la altitud y la precipitación (Fernández, 1996; Ayllón, 2003; Giménez *et al.*, 2003; Fries *et al.*, 2012). Lo anterior se pudo comprobar con los resultados del r^2 mensual entre la altitud y la temperatura que va de 0.72 a 0.84, en cambio para la precipitación varía entre 0.12 y 0.45.

El modelo de aptitud climática puede considerar otras variables que incidan en la distribución y desarrollo de los cultivos como la orientación de las laderas (que incide en la cantidad de horas durante el día que la planta se encuentra expuesta a los rayos del sol), la dirección del viento (influye en la distribución de la precipitación) y la alcalinidad y profundidad del suelo (que inciden en el aporte de nutrientes a los cultivos). Lo anterior, depende de la cantidad de información disponible y de las posibilidades para generar datos de suelo a nivel local. (García *et al.*, 2001; Johansson y Chen, 2004; Dubrovina y Bautista, 2014).

Los datos del modelo climático dan soporte para poder establecer cultivos que tengan una buena correspondencia a nivel local con las condiciones climáticas, pero para estudios más detallados como lo son los procesos fenológicos de las plantas como floración, fructificación, entre otros, que tienen una duración de pocos días o pocas semanas, los datos no son viables,

porque se necesita información climática más detallada como los registros por hora de temperatura y precipitación (Reyes, 2016).

Distribución actual de los cultivos

En México, existen diferentes estudios de zonificaciones agroclimáticas que corresponde con la superficie de tierras marginalmente aptas para el desarrollo de los cultivos en relación a la aptitud climática. En el estado de Guanajuato únicamente el 6.5% del cultivo de maíz se encuentra en zonas aptas, en la Región Huasteca el 40% de la superficie cañera se encuentra en zonas aptas, y por último, para la cuenca del Balsas-Mezcala solo el 44% de la superficie de los cultivos se encuentra en zonas aptas (García *et al.*, 2001; Aguilar *et al.*, 2010; Espejel *et al.*, 2015). Para nuestro estudio, en el municipio de Zitácuaro solo el 27% de los cultivos se encuentran establecidos en zonas aptas, el resto en zonas moderadamente aptas y no aptas.

En el municipio de Zitácuaro se han expandido los cultivos de aguacate, la guayaba y la zarzamora. Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), son 11,706 ha destinadas a la agricultura, de las cuales: 1,238 ha son de aguacate, 1,572 ha de guayaba y 35 ha de zarzamora (SIAP, 2015).

Lo anterior no corresponde con las cifras obtenidas del inventario de los usos agrícolas del suelo para el municipio de Zitácuaro, porque la distribución actual de los cultivos en el municipio es de 7,397 ha de aguacate, 2,203 ha de guayaba y 237 ha de zarzamora. Al no estar disponibles los metadatos que describan los procesos utilizados por el SIAP no se puede explicar o identificar por qué las diferencias en los datos (Anguiano *et al.*, 2006; Morales y Cuevas, 2011).

Cuando se consultan los datos del SIAP a nivel de distrito de desarrollo rural (DDR), las diferencias entre cifras son aún más notorias. Dado que el DDR con el nombre Zitácuaro lo conforman 15 municipios (incluido Zitácuaro). La suma de superficie destinada en el DDR al aguacate, la zarzamora y la guayaba es de 2,002 ha, 88 ha, y 7,431 ha respectivamente (SIAP, 2015). De las cifras mencionadas se hace énfasis en la superficie de la zarzamora porque es menos superficie en todo el DDR (88 ha) que la superficie que se tiene actualmente solo en el municipio de Zitácuaro (237 ha), en inconsistencia de las cifras le sigue el aguacate

con 2,002 ha en el DDR y 7,397 ha en el municipio, pero, en relación a la guayaba las cifras si muestran una tendencia de crecimiento porque en el DDR hay 7,431 ha y en el municipio 2,203 ha, tendencia que también deberían presentar los otros dos cultivos (SAGARPA, 2010a, 2010b, 2010c).

Para el maíz, en el municipio existe una disminución al pasar de 8,645 ha a 7,428 ha entre el periodo de 2004 al 2015 (SIAP, 2015). Evidenciando la expansión de las plantaciones más rentables hacia las zonas de agricultura tradicional.

Usos agrícolas frente a las restricciones de ley establecidas para la conservación

El cultivo del aguacate se ha extendido hacia las zonas de agricultura tradicional y hacia las zonas de la RBMM. En la región se han realizados estudios sobre las condiciones que requiere el cultivo del aguacate y han señalado que Zitácuaro tiene zonas con potencial para su buen desarrollo, amenazando a los bosques templados donde las condiciones para el establecimiento y buen desarrollo del cultivo son ideales (Alcántara *et al.*, 1999; Anguiano *et al.*, 2006).

El municipio alberga 12,328 ha de la RBMM, donde 1,446 ha es superficie agrícola, de las cuales 6.62 ha están dentro de la zona núcleo y 1,428.14 ha se encuentran en zonas de amortiguamiento. En la zona núcleo solo se permiten realizar actividades que no impliquen la modificación de los hábitats tales como el manejo sanitario del bosque, restauración de suelos, regeneración del bosque, elaboración de unidades para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y prevención y combate de incendios, así como actividades de investigación, turismo de bajo impacto y educación ambiental. Mientras que en la zona de amortiguamiento, solo las comunidades establecidas cuando se expidió la declaratoria de la RBMM pueden practicar un aprovechamiento sustentable de recursos naturales y/o aprovechamiento sustentable de agroecosistemas únicamente (DOF, 2000).

En este estudio encontramos que la distribución de los cultivos contradice lo establecido, ya que al practicar la agricultura en la zona núcleo se modifica automáticamente el hábitat y, en la zona de amortiguamiento no se está realizando un aprovechamiento sustentable, solo se está cambiando de cubierta forestal a uso agrícola sin contar con lineamientos de

sustentabilidad para estas prácticas (Ramírez, 2001b; Brenner, 2009; Manzo *et al.*, 2014; Ramírez *et al.*, 2015).

Uno de los impactos que conlleva el cambio de la vegetación forestal hacia las plantaciones de aguacate es la erosión y degradación del suelo, debido a que se necesita que transcurran cuatro años para que la planta se desarrolle y en ese lapso de tiempo el suelo queda desnudo a expensas de los factores erosivos como el agua, aire y la pendiente (De Graaff, 2000; Aguirre y Bárcenas, 2005; Cotler *et al.*, 2007; FAO, 2011; Morales y Cuevas, 2011; Chávez *et al.*, 2012; Tapia y Sáenz, 2012).

Actualmente, los agricultores para evitar la erosión emplean un método que consiste en cultivar maíz entre los espacios que quedan disponibles cuando se está desarrollando la planta de aguacate. Sin embargo el maíz es un cultivo de temporada y no se logra amortiguar el impacto de la lluvia sobre el suelo desnudo. Para lograr el cuidado del suelo, no solo es necesario considerar la cubierta, sino la estructura de la vegetación como la estratificación, las alturas, el diámetro de las hojas, la separación entre ramificaciones, recambio de especies, entre otras (Zhongming *et al.*, 2010).

Uno de los factores más relevantes para la expansión de cultivos como el aguacate, la guayaba y la zarzamora es su rentabilidad (Aguirre y Bárcenas, 2005; Mendoza *et al.*, 2005; SAGARPA, 2010a, 2010b, 2010c; Chávez *et al.*, 2012), la cual, al competir con las compensaciones monetarias de pagos por servicios ambientales que ofrecen a las personas dentro de la RBMM para conservar los bosques, es mayor el beneficio económico que brindan los cultivos (Fitzherbert *et al.*, 2008; Brenner, 2009; CONAFOR, 2013; Haberl *et al.*, 2014).

Al comparar las compensaciones por mantener los bosques con los beneficios económicos que ofrecen los cultivos por hectáreas cosechada, existe una competencia desequilibrada, debido a que pagan 12 dólares por hectárea sujeta a conservación al año (CONAFOR, 2013), mientras que la ganancia del cultivo por hectárea cosechada asciende hasta los 130,000 pesos en el caso del aguacate, que es el competidor directo de la RBMM al establecerse en zonas con vocación forestal (SAGARPA, 2010a, 2010b, 2010c).

Además de proteger el hábitat donde hiberna la Mariposa Monarca, existe otra función crucial de la RBMM, que es el suministro de agua mediante el sistema Cutzamala para las áreas metropolitanas de Toluca y la Ciudad de México (Aguirre y Bárcenas, 2005; Brenner, 2009). Pero, por una parte, existen programas que dan incentivos y realizan actividades que ayuden con la conservación de la RBMM y, por otra, apoyos para el establecimiento de la agricultura como el Programa de Apoyos a Pequeños Agricultores por parte de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (Brenner, 2009; Ibarra, 2011). Ambos incentivos son contradictorios ya que carecen de lineamientos acordes al contexto del lugar donde están. Este tipo de programas de apoyos pueden influir en que los cultivos se sigan expandiendo en el municipio de Zitácuaro, a pesar de las restricciones climáticas, porque el agricultor invierte una parte y la otra es subsidiada por el gobierno y, como la tendencia de los mercados globales está demandando ciertos cultivos, conviene invertir y mejor aun cuando no se arriesga parte o nada de la inversión del agricultor (Romero, 2009).

El apoyo a los agricultores es bueno y contribuye al desarrollo rural y disminución de la pobreza (Chávez *et al.*, 2012), pero se debe de investigar y verificar las zonas dónde se deben de aplicar específicamente esos apoyos, para no ser contradictorio que donde se establezca el cultivo se estén quebrantando otras leyes ya establecidas para la conservación del ambiente, por lo tanto se debe contar con una normatividad de aplicación de los programas agrícolas o que impliquen el aprovechamiento del territorio con otras actividades distintas a la conservación (Sierra y Pérez, 2006; Velázquez *et al.*, 2012).

Se deben de tomar en cuenta las condiciones climáticas para el establecimiento de los cultivos porque tiene que ser competitivo en cuanto a la producción del fruto (Ornelas *et al.*, 2016), Durante el desarrollo de esta investigación, los agricultores comentan que existe diferencia entre lo que se obtiene de un árbol de aguacate ubicado en una parcela a 2,000 msnm comparada con otra a más de 2,500 msnm, el primero produce más de 20 aguacates y el segundo entre 8 y 12. Pero con esta cantidad de frutos por árbol, sigue siendo más rentable que el pago por servicios ambientales, lo que nos indica que en zonas moderadamente aptas el cultivo sigue siendo rentable (Anguiano *et al.*, 2006).

Otro impacto negativo al cambiar la cubierta forestal a cultivos es la modificación de las condiciones climáticas porque los bosques generan ambientes característicos que son aprovechados para el desarrollo de los cultivos locales (Bishop y Landell, 2006). Al cambiar dichas condiciones existiría un desacoplamiento en la distribución actual de la vegetación en general al no contar con las mismas características climáticas, repercutiendo en los agricultores, como también en la conservación de la vegetación natural como el Oyamel, Pino y Encino, además de que los bosques protegen tanto al suelo como a los cultivos de los fuertes vientos que existen en la zona (Sáenz *et al.*, 2012).

Las zonas aptas para el desarrollo de los cultivos en función del clima actualmente se encuentran ocupadas, ocasionando que la expansión de los cultivos más rentables se dirija hacia zonas con menos potencial. Con ayuda de los resultados de la caracterización climática del municipio se pueden seleccionar otros cultivos que se adapten mejor a las zonas no aptas para la distribución de los cultivos actuales, aumentando la variedad de cultivos con el potencial agrícola de la región, disminuyendo la presión en las cubiertas forestales de la RBMM (Díaz *et al.*, 2000; López *et al.*, 2014; Reyes, 2016).

Para las zonas de aptitud climática no aptas dentro de la RBMM, sino está siendo económicamente rentable porque no existen las condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos y además, genera impactos negativos en el ambiente como en la calidad del agua y la erosión del suelo, es conveniente conservar los bosques, porque al alterar el componente biofísico del paisaje puede afectar la capacidad para sostener la actividad agrícola (Lambin *et al.*, 2001; Guhl, 2004).

El municipio de Zitácuaro es considerado como zona de atención prioritaria porque el 58% de su población se encuentra en situación de pobreza, lo que indica que tiene al menos una carencia social en los indicadores de rezago educativo, acceso a servicios de salud, seguridad social, calidad y espacios de vivienda y acceso a la alimentación (CONEVAL, 2010).

Lo anterior, es uno de los factores que se encuentra ejerciendo una fuerte presión sobre los bosques, debido a que la agricultura es la principal actividad económica del municipio (Alcántara *et al.*, 1999; Ramírez, 2001a; Bravo *et al.*, 2012). Lo que conlleva a la interrogante de si la actividad agrícola con los cultivos de alta rentabilidad como son el aguacate, la guayaba y la zarzamora han logrado reducir la pobreza en el municipio.

Conclusiones

El municipio de Zitácuaro cuenta con una gran actividad agrícola debido a que éste ocupa el 38% de su territorio. Dentro del cual, encontramos cultivos con diferentes requerimientos climáticos, esto gracias al efecto del relieve que genera cambios en las variables climáticas en distancias relativamente cortas, principalmente en la temperatura.

En el municipio podemos definir dos ciclos de cultivos: primavera-verano y perennes. En el primero encontramos cultivos como el maíz, trigo y la calabaza, y para el segundo encontramos el maguey y plantaciones frutícolas como el aguacate, la zarzamora, la guayaba y el durazno. Además, de plantaciones arbóreas de pino ayacahuite que se venden como árboles para las fiestas decembrinas que se cortan anualmente.

Existe una gran diferencia entre la extensión de superficie que ocupa cada cultivo, los más representativos del municipio son las plantaciones aguacateras y el cultivo de maíz, entre los dos ocupan el 85% de la superficie agrícola, seguido de la guayaba y la zarzamora con el 14%.

En la parte baja del municipio (suroeste) el cultivo de guayaba se está expandiendo hacia las zonas de matorrales porque es más resistente a las temperaturas altas y a las sequías. Mientras que la zarzamora se expande en zonas de encino.

En la parte alta del municipio (noreste) ocurre una conversión del cultivo de maíz y vegetación forestal, como pino y encino, a plantaciones de aguacate. Dicha vegetación forestal se encuentra dentro del ANP de la RBMM.

El municipio de Zitácuaro alberga 12,328 ha (22% de su superficie total) de la RBMM, donde 1,446 ha (12%) es superficie agrícola. Dichas parcelas están dentro de la zona núcleo como de amortiguamiento, lo que no debería de estar ocurriendo de acuerdo al Programa de Manejo de la RBMM publicado en el año 2001.

La distribución actual de los cultivos en el municipio de Zitácuaro corresponde con el modelo de aptitud climática, esto se debe al conocimiento local que tienen los agricultores sobre los tipos de cultivos que manejan y, que al mismo tiempo valida los resultados del modelo al compararlo con lo que sucede en la práctica agrícola.

Los modelos de aptitud climática dan un amplio panorama para la regulación de cambio y uso de suelo, en primer lugar, el agricultor puede consultar y seleccionar los diferentes cultivos que son aptos para el establecimiento en sus parcelas y, en segundo lugar, disminuye presión sobre los recursos forestales al identificar otros sitios con buena aptitud climática, respetando los lineamientos ya establecidos de la RBMM.

La competencia en el municipio entre los cultivos y la RBMM se encuentra desequilibrada, lo que se debe principalmente a la demanda tanto nacional como internacional de las plantaciones frutícolas, generando inversiones en la actividad agrícola que sobrepasan los pagos por servicios ambientales, con lo cual se prioriza la producción repercutiendo en la conservación de los bosques templados. A nivel regional, las alteraciones a la vegetación natural dentro de la RBMM puede afectar el suministro de agua para las áreas metropolitanas de Toluca y la Ciudad de México.

Los usos agrícolas llevan ventaja económica sobre la cubierta forestal que se encuentran dentro de la RBMM, pero dicha cubierta genera las condiciones climáticas actuales en las cuales se desarrollan los cultivos, por lo tanto, es conveniente conservar los bosques para no afectar la producción agrícola.

Referencias

Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J. y Contreras, C. (2010) "Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México)", *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), pp. 144–154.

Aguirre, S. y Bárcenas, A. E. (2005) "Uso Agrícola", en *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 133–136.

Alcántara, J. J., Anguinao, J., Coria, M. V, Hernández, G. y Ruiz, J. A. (1999) "Áreas potenciales para cultivo del aguacate (*Persea americana* cv. Hass) En el estado de Michoacán, México.", *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, pp. 151–154.

Anguiano, J., Alcántar, J. J., Toledo, R., Tapia, L. M., Ruíz, J. A. y Rodríguez, Y. (2006) "Caracterización edafo-climática del área productora de Aguacate de Michoacán." México D.F.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo experimental Uruapan, p. 195.

Argote, C. N. (2012) *Interacciones causales del necrosamiento de yemas florales en zarzamora "Tupy"*. Colegio de Postgraduados.

Avendaño, A. (2012) *Manual para el establecimiento, manejo y operación de un huerto de durazno*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ayllón, T. (2003) "Climatología", en *Elementos de meteorología y climatología*. 2a ed. México D.F.: Editorial Trillas, p. 210.

Bautista, F., Cram, S. y Sommer, I. (2011) "Suelos", en Bautista, F., Palacio, J. L., y Delfín, H. (eds.) *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Segunda Ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, p. 770.

Bezaury, J. y Gutiérrez, D. (2009) "Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México", en Graf, S. y Gómez, A. (eds.) *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. México: CONABIO, pp. 385–431.

Bishop, J. y Landell, N. (2006) "Los servicios ambientales de los bosques", en Pagiola, S., Bishop, J., y Landell-Mills, N. (eds.) *La venta de servicios ambientales forestales*. 2a ed. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de ecología, p. 460.

Bonilla, N. (2009) *Manual de recomendaciones técnicas: cultivo de maíz (*Zea mays*)*, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Costa Rica: Instituto Naciona de Innovación y Tranferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Disponible en: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&B1=Buscar&formato=1&cantidad=50&expresion=ZEA>.

Bravo, M., Sánchez, J., Vidales, J. A., Sáenz, J., Chávez, J., Madrigal, S., Muñoz, H. J., Tapia, L. M., Orozco, G., Alcántar, J. J., Vidales, I. y Venegas, E. (2012) *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán, Campo Experimental Uruapan*. México: Instituto Nacional De Investigaciones Forestales Agrícolas Y Pecuaria. Disponible

en: http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/libro_aguacate.pdf.

Brenner, L. (2009) "Aceptación de políticas de conservación ambiental : el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca", *Economía, Sociedad y Territorio*, 30, pp. 259–295.

Brower, L. P., Williams, E. H., Jaramillo, P., Kust, D. R., Slayback, D. A. y Ramírez, M. I. (2017) "Butterfly Mortality and Salvage Logging from the March 2016 Storm in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico", *American Entomologist*, 63(3), pp. 151–164.

Buenrostro, O., Mendoza, M. y Lopez, E. (2005) "Análisis comparativo de tres modelos de soporte de decisiones espaciales en la selección de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo , México", *Investigaciones Geográficas*, 57(382), pp. 21–38.

Cantú, M. X. (2013) *Incendios de 2012 en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: caracterización y respuesta institucional*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cerdas, M., Montero, M. y Díaz, E. (2006) *MANUAL DE MANEJO PRE Y POSCOSECHA DE AGUACATE (Persea americana)*. Costa Rica.

Chávez, G., Mario, V. L., Bravo, M., Sáenz, J. T., Muñoz, H. J., Vidales, I., Larios, A., Rentería, J. B., Villaseñor, F. J., Sánchez, J. de la L., Alcántar, J. J. y Mendoza, M. (2012) *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. Uruapan, Michoacán: Instituto Nacional De Investigaciones Forestales Agrícolas Y Pecuaria.

CONABIO (2012) *Cucurbita pepo pepo*.

CONAFOR (2012) "Pinus ayacahuite Ehrenb", *Comisión Nacional Forestal*, pp. 1–7. Disponible en: http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/953Pinus_ayacahuite.pdf.

CONAFOR (2013) *El Fondo Monarca. Un instrumento innovador de pago por servicios ambientales en apoyo a la conservación de bosques y a la retribución a las comunidades forestales*. Zapopan, Jalisco. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/5107monarca.pdf>.

CONAGUA (2016) *Información Climatológica, Servicio Meteorológico Nacional*. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica> (Consultado: el 18 de agosto de 2016).

CONEVAL (2010) *Medición de la pobreza, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Disponible en: <http://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Tablas-dinamicas-municipales.aspx> (Consultado: el 5 de febrero de 2017).

Coria, V. M., Alcántar, J. J., Anguiano, J., Chávez, G., Ruíz, J. A., Luis, A., Mendoza, M. R. y Vidales, J. A. (2005) "Caracterización edáfica, climática y de organismos dañinos asociados al durazno en michoacán." Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP), Centro de investigación regional del pacífico centro, campo experimental uruapan, p. 2.

Corral, J. A., Garcia, G., González, I. J., Flores, H. E., Ramírez, G., Ortíz, C., Byerly, K. F. y Martínez, R. A. (2013) *Requerimientos agroecológicos de cultivos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), centro de investigación regional del pacífico centro, campo experimenta centro Altos de jalisco*.

Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. y Quiñones, L. (2007) "La conservación de suelos: un asunto de interés público", *Gaceta Ecológica*, (83), p. 71. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908302>.

Deguignet, M., Juffe-Bignoli, D., Harrison, J., Macsharry, B., Burgess, N. y Kingston, N. (2014) *2014 United Nations List of Protected Areas.*, UNEP-WCMC : cambrige, UK. United Nations Environment Program-World Conservation Monitoring Centre: Cambridge, UK. Disponible en: <http://www.unep-wcmc.org/posters/ScientificSeries/sowpa/pdfs/lowres/regional2.pdf>.

Deras, H. (2011) *Guía técnica El cultivo del maíz.*

Díaz, B. M., Plascencia, H., Arteaga, R. y Vazquez, M. A. (2000) “Estudio y zonificación agroclimáticos en la región Los Altos de Chiapas, México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 1(47), pp. 7–27. Disponible en: www.geograf.unam.mx/instituto/boletin.html.

DOF (1986) “Decreto que declara áreas naturales protegidas para los fines de la migración, invernación y reproducción de la Mariposa Monarca.”, *Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación*, 16 febrero, pp. 33–41.

DOF (2000) “Decreto de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM).”, *Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación*, 16 febrero, pp. 5–29.

Dubrovina, I. A. y Bautista, F. (2014) “Analysis of the suitability of various soil groups and types of climate for avocado growing in the state of Michoacán, Mexico”, *Eurasian Soil Science*, 47(5), pp. 491–503. doi: 10.1134/S1064229314010037.

Espejel, A., Romero, J., Barrera, A. I., Torres, B. y Félix, J. (2015) “Determinación del uso potencial agrícola mediante modelación geoespacial y análisis multicriterio para la cuenca Balsas Mezcala”, *Ra Ximhai*, 11(5), pp. 77–95.

FAO (2007) *Situación de los bosques del mundo.* Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/a0773s/a0773s00.htm> (Consultado: el 22 de febrero de 2017).

FAO (2011) *The State of the World's land and water resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk*, Food and Agriculture Organization. doi: 978-1-84971-326-9.

FAO (2015) *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2015. Compendio de datos, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.* Roma, Italia. doi: ISBN 978-92-5-106654-6.

Faraway, J. J. (2006) “Repeated measures and longitudinal data”, en *Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models*, pp. 1–28. doi: 10.1111/j.1541-0420.2006.00596_12.x.

Félix, P., Ortiz, J. E., Fuentes, G., Quintana, J. G. y Grajeda, J. (2009) *Horas frío en relación al rendimiento de trigo.*

Fernández, F. (1996) “Clima, vegetación y cultivos. Índices de aridez y productividad”, en *Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación.* 1a ed. Madrid, España: Editorial Síntesis, p. 279.

Fitzherbert, E. B., Struebig, M. J., Morel, A., Danielsen, F., Brühl, C. A., Donald, P. F. y Phalan, B. (2008) “How will oil palm expansion affect biodiversity?”, *Trends in Ecology and Evolution*, 23(10), pp. 538–545. doi: 10.1016/j.tree.2008.06.012.

Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T. y Bendix, J. (2012) “Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization”, *Agricultural*

and *Forest Meteorology*, 152(1), pp. 17–30. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.08.004.

Garbanzo Solís, M. (2011) *Manual de Aguacate. Buenas Prácticas de Cultivo Variedad Hass*. San José, Costa Rica.

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

García, H., García, R. R., Moreno, R., López, J. y Villers, M. de L. (2001) “Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras”, *Agricultura Técnica en México*, 27(2), pp. 107–108.

García, M. A. (2010) *Guía técnica del cultivo de la guayaba, Ministerio de Agricultura y Ganadería*. EL Salvador.

Giménez, J., Ramírez, M. I. y Pinto, M. (2003) “Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México, México): Clasificación, composición y distribución”, *Lazaroa*, (24), pp. 87–111.

Gómez-Mendoza, L., Galicia, L. y Aguilar-Santelises, R. (2008) “Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México.”, *Investigaciones Geográficas*, 67(1003), pp. 76–100.

Gómez, L. y Medina, M. de la paz (2012) *Guía de métodos estadísticos en climatología*. Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. DGAPA-PA-PIME. UNAM.

De Graaff, J. (2000) *Downstream effects of land degradation and soil and water conservation. Background Paper 5*. Roma, Italia: FAO.

Granados, R. y Longar, M. del P. (2008) “Variabilidad pluvial, agricultura y marginación en el estado de Michoacán”, *Análisis Económico*, 23, pp. 283–303.

Granados, R., Reyna, T., Soria, J. y Fernández, Y. (2004) “Aptitud agroclimática en la Mesa Central de Guanajuato, México.”, *Investigaciones Geográficas*, 54, pp. 24–35.

Green, R. E., Stephen, J. C., Scharlemmann, J. y Balmford, A. (2005) “Farming and the fate of wild nature.”, *Science*, 307(5709), pp. 550–555. doi: 10.1126/science.1106049.

Guhl, A. (2004) “Café y cambio de paisaje en la zona cafetera colombiana entre 1970 y 1997”, *Cenicafé*, 55(1), pp. 29–44. Disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/102>.

Guitérrez, E. y Trejo, I. (2014) “Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México”, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), pp. 179–188. doi: 10.7550/rmb.37737.

Haberl, H., Mbow, C., Deng, X., Irwin, E. G., Kerr, S., Kuemmerle, T., Mertz, O., Meyfroidt, P. y Turner, B. L. (2014) “Finite Land Resources and Competition”, en Seto, K. C. y Reenberg, A. (eds.) *Rethinking global land use in an urban era*. Cambridge, Massachusetts: MIT press, p. 394.

Hoersch, B., Braun, G. y Schmidt, U. (2002) “Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2–3), pp. 113–139. doi: 10.1016/S0198-9715(01)00039-4.

Ibarra, M. V. (2011) “Conformación del espacio social de los bosques del ejido del Rosario,

- Michoacán, 1938-2010”, *Investigaciones Geográficas*, 75, pp. 75–87.
- IICA-Nicaragua (2007) *Guía práctica para la exportación a EE.UU, IICA-Nicaragua*.
- IIFT (2011) “Instructivo técnico para el cultivo de la guayaba”. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical, p. 44.
- INEGI (2010a) *Censo de población y vivienda 2010.*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/> (Consultado: el 20 de marzo de 2017).
- INEGI (2010b) “Compendio de información geográfica municipal 2010. Zitácuaro, Michoacán.” México D.F.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, p. 10.
- INEGI (2014) *Perspectiva estadística. Michoacán de Ocampo*.
- IUCN y UNEP-WCMC (2014) *The World Database on Protected Areas (WDPA).*, Available at: www.protectedplanet.net. Cambridge, UK: United Nations Environment Program-World Conservation Monitoring Centre. Disponible en: <https://www.protectedplanet.net/>.
- Johansson, B. y Chen, D. (2004) “Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data: a case study in Sweden”, *Climate Research*, 29(1979), pp. 53–61. doi: 10.3354/cr029053.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Folke, C., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U. y Veldkamp, T. A. (2001) “The causes of land-use and land-cover change : moving beyond the myths”, *Global Environmental Change*, 11, pp. 261–269.
- Leal, O. A., Mendoza, M. E. y Carranza, E. (2010) “Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo , México.”, *Investigaciones Geográficas*, 72(8701), pp. 49–67.
- Lemus, G., Ferreyra, R., Gil, P., Sapúlveda, P., Maldonado, P., Toledo, C., Barrera, C. y Celedon, J. M. (2010) *El Cultivo del Palto, Boletín INIA*.
- López, G. Al. y Mateo, J. J. (2006) *Catálogo de árboles y arbustos*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- López, J., Manzo, L. L. y Alcántara, I. (2014) “Rural aquaculture as a sustainable alternative for forest conservation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico”, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 138(Julio), pp. 43–54. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.01.035.
- Luna, W., Estrada, H., Jiménez, J. y Pinzón, L. (2012) “Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias”, *Terra Latinoamericana*, 30(4), pp. 343–353.
- Manzo, L., López, J. y Alcántara, I. (2014) “Role of forest conservation in lessening land degradation in a temperate region: The Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico”, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 138, pp. 55–66. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.017.
- Martínez, M. D. C. y Pérez, E. L. (2008) *Análisis del mercado potencial del tequila 100% Agave*. Instituto Politécnico Nacional. doi: 10.1016/S0262-4079(08)61545-6.
- Mas, J. F., Lemoine Rodríguez, R., González, R., López Sánchez, J., Piña Garduño, A. y Herrera Flores,

- E. (2017) "Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT", *Madera Bosques*, 23(2), pp. 119–131. doi: 10.21829/myb.2017.2321472.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. y 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(4), pp. 249–261. doi: 10.1016/j.jag.2004.06.002.
- Meinke, H., Nelson, R., Kokic, P., Stone, R., Selvaraju, R. y Baethgen, W. (2006) "Actionable climate knowledge: from analysis to synthesis", *Climate Research*, 33, pp. 101–110.
- Mendoza, M. R., Luis, A. y Castillo, S. F. (2004) "Guayaba (*Psidium guajava* L.) su cultivo en el oriente de Michoacán", *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP. Campo Experimental Uruapan*, p. 43.
- Mendoza, M. R., Luis, A., Castillo, S. F. y Vidales, I. (2005) "Diagnostico del manejo actual del cultivo de guayaba en la region Oriente de Michoacán", *Centro de Investigaciones del Pacífico, INIFAP*, p. 57. Disponible en: http://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo_sectorial/Michoacan/42michoacan.pdf.
- Molina, A. y Reyes, A. de J. (2009) "Aplicación de técnicas estadísticas y geoestadísticas para elaborar cartografía de precipitaciones. Departamentos del occidente de Nicaragua.", *Revista Ciencias Espaciales*, 8, pp. 143–159.
- Morales, J. L., López, M. R., Coria, V. M., Aguirre, J. L., Sánchez, J. D. L. L., Vidales, J. A., Tapia, L. M., Hernández, G. y Alcántar, J. J. (2013) "Tecnología-Produce Aguacate En Michoacán", *Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce*, pp. 1–32. Disponible en: www.cofupro.org.mx.
- Morales, L. M. y Cuevas, G. (2011) *Inventarios 1974-2007, y evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el estado de Michoacán*. Informe Final. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Morelia, MICH.138 pp.
- Novoa, R. y Villaseca, S. (1987) "Requerimientos de suelo y clima en trigos de primavera", *IPA La Platina*, 42, pp. 38–40.
- Ornelas, P., Cisneros, B., Campos, J., Aguilar, J., Tenorio, J., Orozco, C., Sarmiento, R., Díaz, S. y Hernández, A. (2016) *Atlas agroalimentario 2016*. Primera. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016.
- Ortiz, C. A., Espinosa, D., Velázquez, A., Figueroa, B., García, J. L., López, G., Casco, R., Arriaga, R. y Lichtinger, V. (2002) *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional*. México, SEMARNAT-Colegio de Posgraduados.
- Pagiola, S. (1999) *The Global Environmental Benefits of Land Degradation Control on Agricultural Land*. Washington D.C.: World Bank Environment Paper n°16.
- Pérez-Portilla, E. y Geissert-Kientz, D. (2006) "Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (*coffea arabica* L.) - Palma camedor (*chamaedorea elegans* mart.)", *Interciencia*, 31(8), pp. 556–562.

- Pérez, M. H. y Vázquez, V. (2004) "Zarzamora (*Rubus* spp.) su cultivo y producción en el trópico mexicano", *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP*. Nayarit. México, p. 37.
- Pinzón, E. H., Cruz, A. y Fischer, G. (2014) "Aspectos fisiológicos del duraznero (*Prunus persica* [L.] Batsch) en el trópico alto. Una revisión.", *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), pp. 401–411. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2/v17n2a11.pdf>.
- Prudhomme, C. y Reed, D. W. (1998) "Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region: a case study in Scotland.", *International Journal of Climatology*, 18(November 2014), pp. 1439–1453. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19981115)18.
- Pucha-Cofrep, F. (2012) *Crear un mapa de isotermas considerando el gradiente altitudinal*. Disponible en: <https://acolita.com/crear-un-mapa-de-isotermas-considerando-el-gradiente-altitudinal-arcgis/> (Consultado: el 2 de febrero de 2017).
- Ramírez, M. I. (2001a) "Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000", *Investigaciones Geográficas*, 45, pp. 39–55.
- Ramírez, M. I. (2001b) *Los espacios forestales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México)*, México: Una revisión geográfica. Universidad Complutense de Madrid. doi: ISBN: 978-84-693-1123-3.
- Ramírez, M. I., Azcárate, J. G. y Luna, L. (2003) "Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forests, Mexico", *Forestry Chronicle*, 79(2), pp. 242–246. doi: 10.5558/tfc79242-2.
- Ramírez, M. I., Sáenz, C., Rehfeldt, G. y Salas, L. (2015) "Threats to the availability of overwintering habitat in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve", en *Monarchs in a changing world. Biology and conservation of an iconic butterfly*, p. 312. doi: 10.1073/pnas.0703993104.
- Ramírez y Zubieta (2005) *Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Región Mariposa Monarca. Reporte técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca*. México D.F. Septiembre 2005.
- Rendón, E., Pérez, J., Galindo, C. y Ibarra, A. (2005) *Memorias del primer foro regional Mariposa Monarca*. 23, 24 y 25 de marzo de 2004. Valle de Bravo, Estado de México.
- Reyes, E. R. (2016) *La observación fenológica comunitaria en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: Una alternativa de adaptación ante el cambio climático*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Rodríguez, M. D. L., López, J. y Vela, G. (2013) "Indicadores ambientales biofísicos a escala detallada para la planeación territorial en Milpa Alta, Centro de México", *Investigaciones Geográficas*, 80(6), pp. 21–35. doi: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.36394>.
- Romero, H. (2009) "Comodificación, exclusión y falta de justicia ambiental", *Serie Geografía*, p. 410. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118085/Comodificacion_exclusion_y_falta_de_justicia_ambiental.pdf?sequence=1.
- Ruiz, J. A., Pimienta, E. y Julia, Z. (2002) "Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de agave tequilana en el Estado de Jalisco", *Agrocencia*, 36(1), pp. 41–53.
- Ruiz, J. U., Medina, G., González, I. J., Flores, H. E., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K. F. y Martínez, R.

- A. (2013) *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. segunda ed. Jalisco, México.
- Sáenz, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J. y Richardson, B. A. (2012) "Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacán state, México. Impacts on the vegetation.", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), pp. 333–345. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5.
- SAGARPA (2010a) "El sistema producto Aguacate en Michoacán. Bases y estrategias para mejorar su competitividad.", *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. México, p. 60.
- SAGARPA (2010b) "El sistema producto Zarzamora en Michoacán: Bases y estrategias para mejorar su competitividad". México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, p. 60.
- SAGARPA (2010c) "La arena competitiva Internacional: Tendencias del mercado mundial de la Guayaba ." México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, p. 60.
- SAGARPA (2011) *Monografía de cultivos. Aguacate*. México D.F.: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Salvatore, M., Kassam, A., Gutierrez, A. C., Bloise, M. y Marinelli, M. (2010) "Metodología de evaluación de aptitud de tierras", *Bioenergía y Seguridad Alimentaria*, pp. 11–19.
- SEMARNAT (2007) "Propuesta de programa de ordenamiento ecológico territorial de la region mariposa monarca (POETMM)". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 3000.
- Seoáñez, M., Bellas, E., Casabella, E., Díaz, A., López, A., Martín, M., Mazarías, J. M., Nuño, F., Rubio, C., Seoáñez, P., de Paz, A. J., Castillos, M., Hoyos, Á., Llorca, O. I., Martínez, F., Muñoz, D., Pérez, R. y Vílcher, M. del C. (2002) "Crecimiento vegetal, desarrollo y clima", en *Tratado de climatología aplicada a la ingeniería ambiental. Análisis climático. Uso del análisis climático en los estudios medioambientales*. España: Mundi-Prensa, p. 721.
- Sepúlveda, O. y Torres, A. (2012) *El cultivo del trigo, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)*. Disponible en: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BAC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=014718>.
- SIAP (2015) *Anuario estadístico de la producción agrícola.*, *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (Consultado: el 2 de febrero de 2017).
- Sierra, E. M. y Pérez, S. P. (2006) "Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agroecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina", *Revista de Climatología*, 6, pp. 1–12.
- Suárez, G. M., Soto, F., Garea, E. y Solano, O. J. (2015) "CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL MACIZO MONTAÑOSO NIPE-SAGUA-BARACOA, EN FUNCIÓN DE LA ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA PARA EL CACAO (*Theobroma cacao* L.). (Spanish)", *Mountain massif agroclimatic characterization Nipe-Sagua-Baracoa, according to the zoning agroecological for cocoa (*Theobroma cacao* L.). (English)*, 36(1), pp. 23–28. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=102032629&lang=es&site=ehost-live>.

- Tapia, L. M. y Sáenz, J. T. (2012) “cambio de uso de suelo y erosión”, en Chávez, G., Tapia, L. M., Bravo, M., Sáenz, J. T., Muñoz, H. J., Vidales, I., Larios, A., Rentería, J. B., Villaseñor, F. J., Sánchez, J. de la L., Alcántar, J. J., y Mendoza, M. (eds.) *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. 1a ed. México D.F.: Instituto Nacional De Investigaciones Forestales Agrícolas Y Pecuaria, p. 102.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., Antonio, C. D., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D. y Swackhamer, D. (2001) “Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change”, *Science*, 292, pp. 281–284.
- Torres, P., Cruz, J. G. y Acosta, R. (2011) “Vulnerabilidad agroambiental frente al cambio climático. Agendas de adaptación y sistemas institucionales.”, *Política y Cultura*, (36), pp. 205–232.
- Tran, L. T., Knight, C. G., O’Neill, R. V., Smith, E. R., Riitters, K. H. y Wickham, J. (2002) “Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid-Atlantic region”, *Environmental Management*, 29(6), pp. 845–859. doi: 10.1007/s00267-001-2587-1.
- Velasco, I. y Pimentel, E. (2010) “Zonificación agroclimática de Papadakis aplicada al estado de Sinaloa, México”, *Investigaciones Geográficas*, 73, pp. 86–102.
- Velázquez, A., Martínez, L. M. y Carrillo, F. M. (2012) “Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediante el sistema de Köppen, modificado por García, y técnicas de sistemas de información geográfica”, *Investigaciones Geográficas*, 79(203), pp. 7–19.
- Velázquez, A., Mas, J., Díaz Gallegos, J., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. (2002) “Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México”, *Gaceta Ecológica*, 62, pp. 21–37. doi: 10.4067/S0718-23762009000200004.
- Vidal, R. (2005) *Las regiones climáticas de México*. Editado por M. Pavón. México D.F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villa, N., Follador, M., Ratto, M. y Leip, A. (2012) “A comparison of eight metamodeling techniques for the simulation of N₂O fluxes and N leaching from corn crops”, *Environmental Modelling and Software*, 34, pp. 51–66. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.003.
- Zacarías, Y. y Del Castillo, R. (2010) “Comunidades vegetales templadas de la Sierra Juárez, Oaxaca: pisos altitudinales y sus posibles implicaciones ante el cambio climático.”, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, pp. 13–28.
- Zak, M. R., Cabido, M., Cáceres, D. y Díaz, S. (2008) “What drives accelerated land cover change in central Argentina? Synergistic consequences of climatic, socioeconomic, and technological factors”, *Environmental Management*, 42(2), pp. 181–189. doi: 10.1007/s00267-008-9101-y.
- Zhongming, W., Lees, B. G., Feng, J., Wanning, L. y Haijing, S. (2010) “Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion”, *Catena*. Elsevier B.V., 83(1), pp. 87–93. doi: 10.1016/j.catena.2010.07.006.

Anexos

Anexo 1: Verificación en campo y estructura de la encuesta.

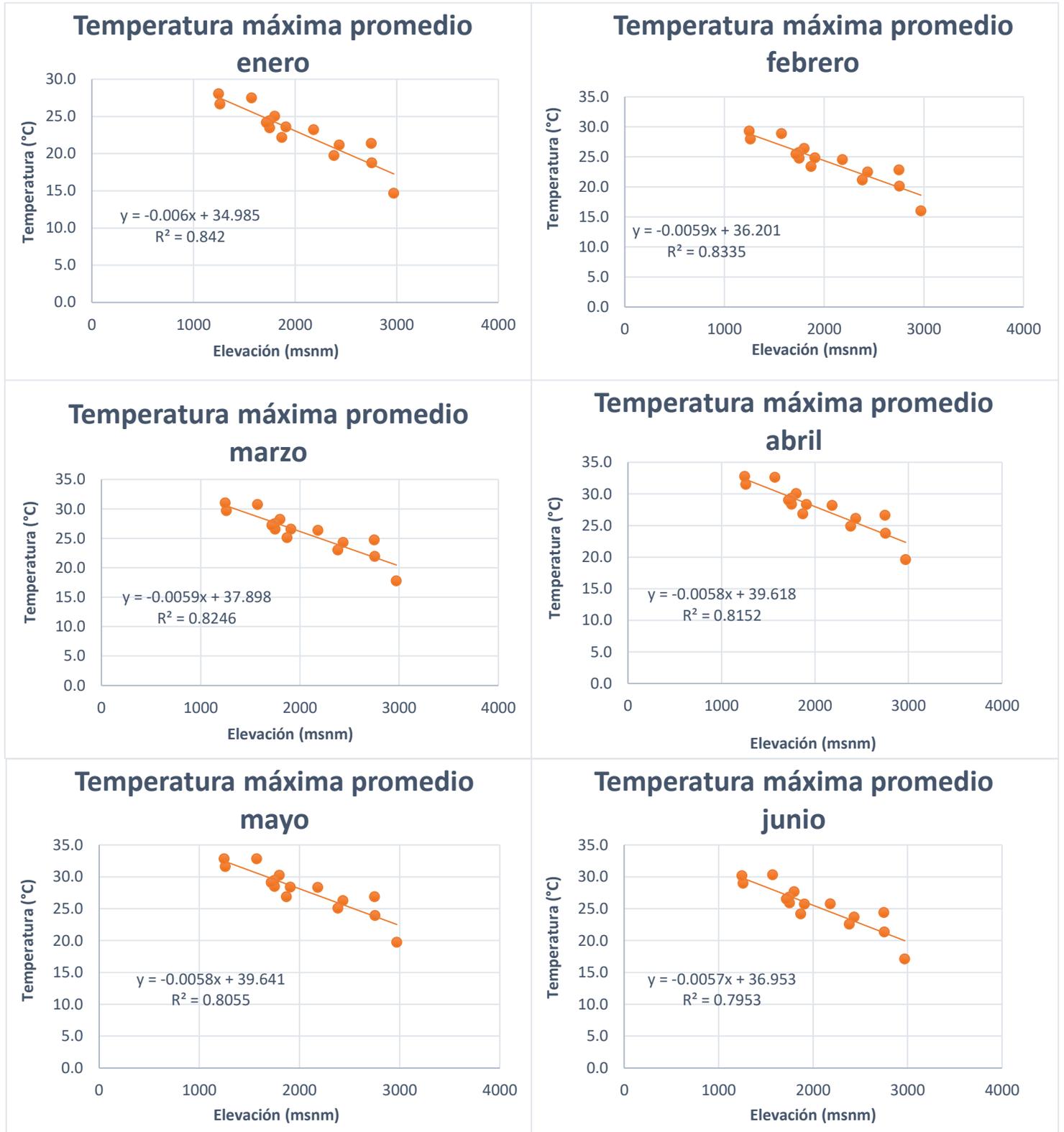
- Verificación de los cultivos en campo.

| | | | |
|-----------------------|----|-----------------------------------|----|
| Localidad: | | Fecha: | |
| Coordenadas | X: | Y: | Z: |
| Cultivo | | Meses de siembra y cosecha | |
| | | | |
| Observaciones: | | | |
| | | | |
| Localidad: | | Fecha: | |
| Coordenadas | X: | Y: | Z: |
| Cultivo | | Meses de siembra y cosecha | |
| | | | |
| Observaciones: | | | |
| | | | |

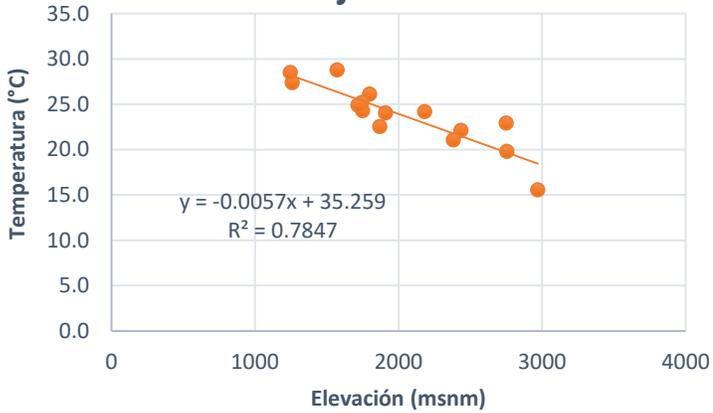
- Estructura de la encuesta.

1. ¿Usted siente que ha cambiado la temporada de lluvias y cómo afecta esto a los cultivos?
2. ¿Usted siente que ha cambiado la temperatura y cómo afecta esto a los cultivos?
3. ¿Ha presenciado eventos extraordinarios cómo heladas, lluvias intensas u otros?
4. ¿Fecha en la que recuerde ciertos eventos extraordinarios?

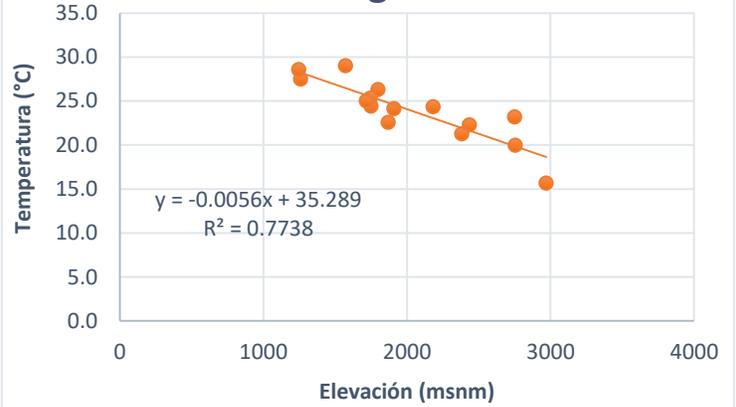
Anexo 2: Correlación entre la altitud y la temperatura máxima promedio mensual.



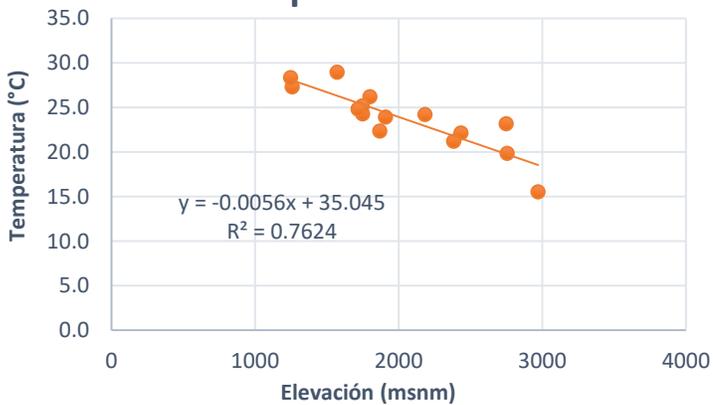
Temperatura máxima promedio julio



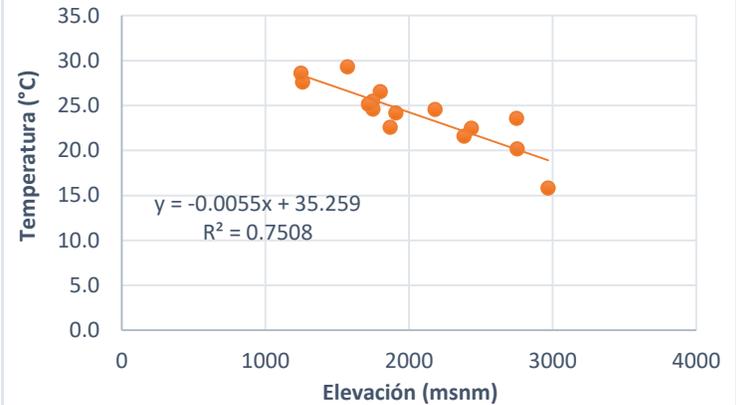
Temperatura máxima promedio agosto



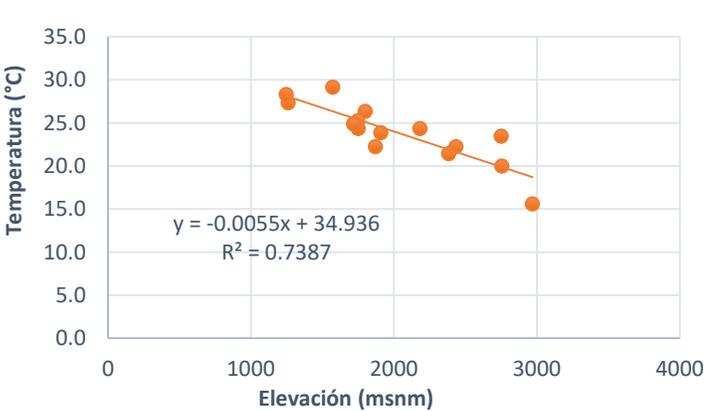
Temperatura Máxima Promedio septiembre



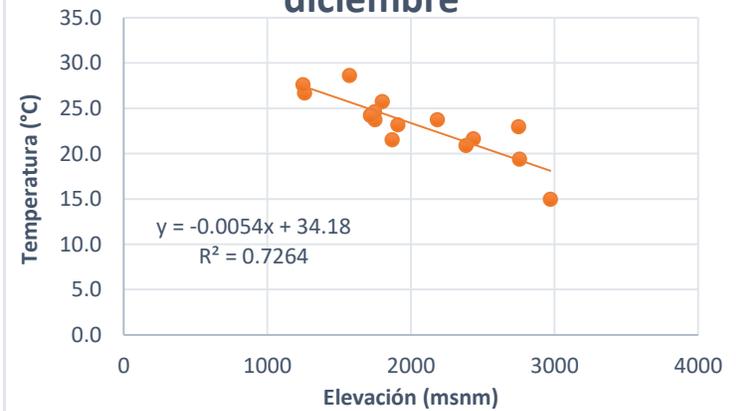
Temperatura máxima promedio octubre



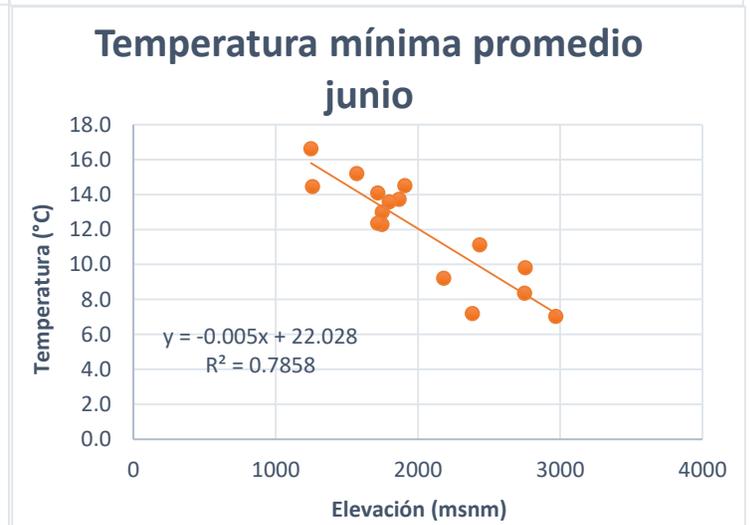
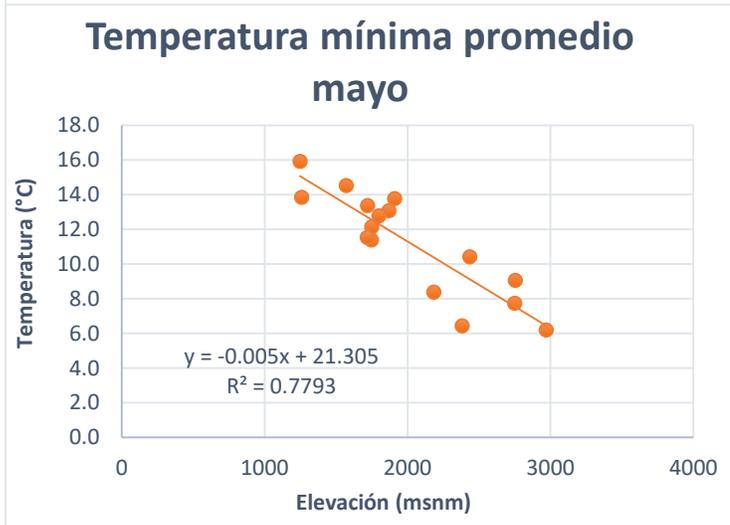
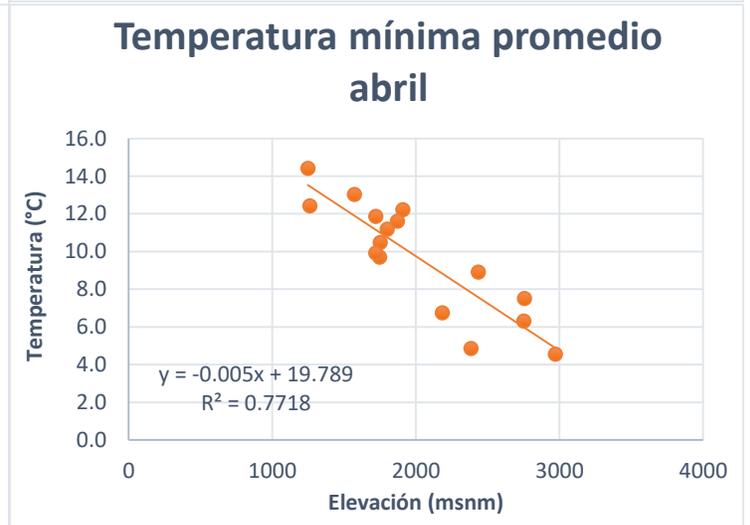
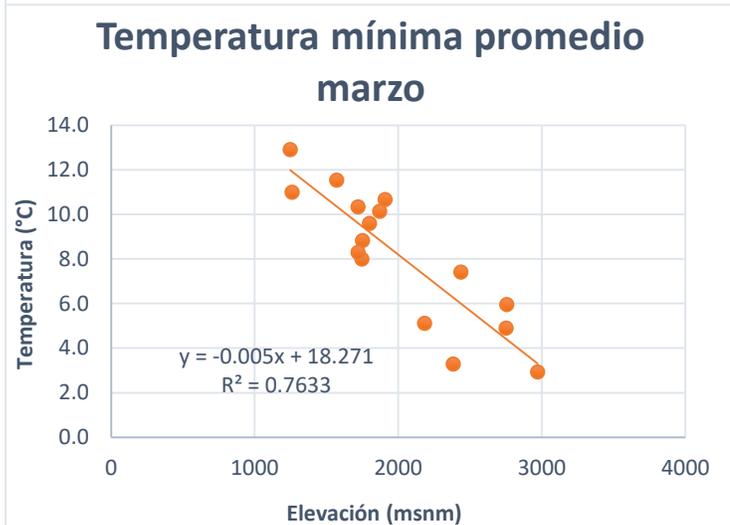
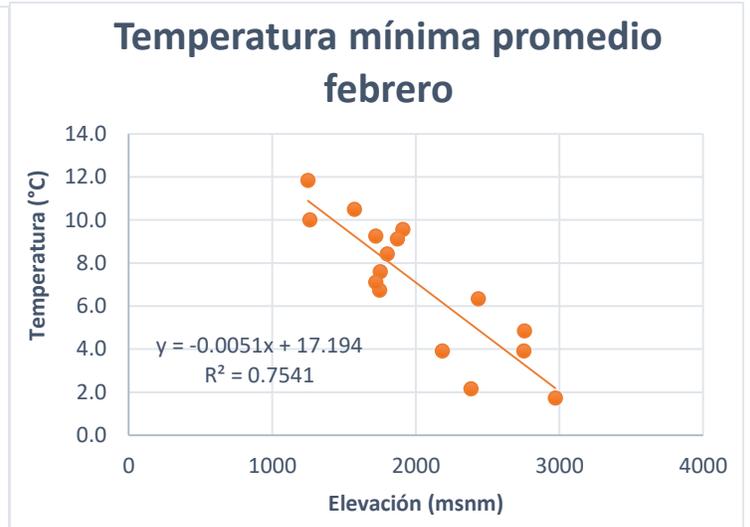
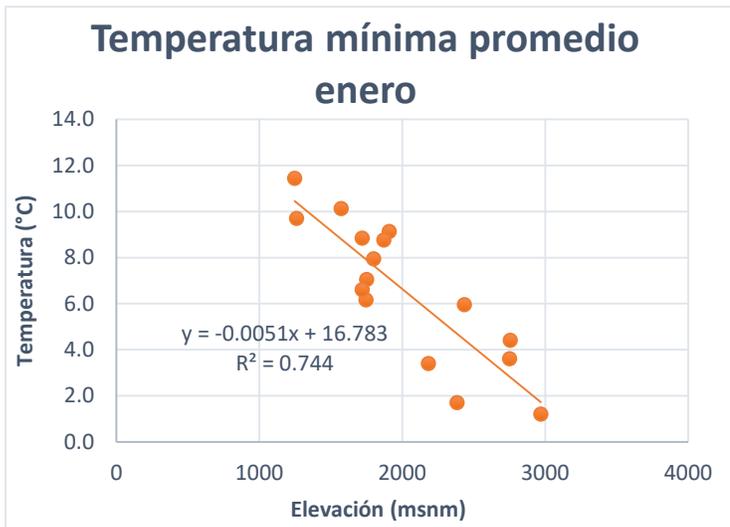
Temperatura máxima promedio noviembre



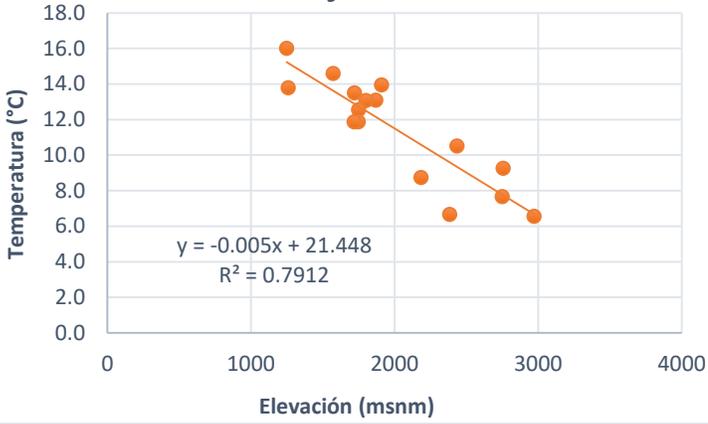
Temperatura máxima promedio diciembre



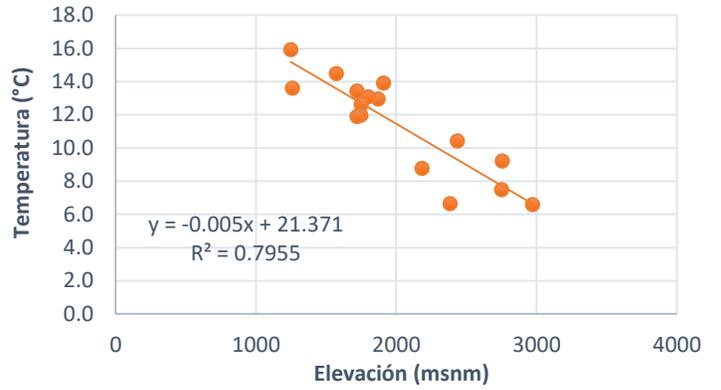
Anexo 3: Correlación entre la altitud y la temperatura mínima promedio mensual.



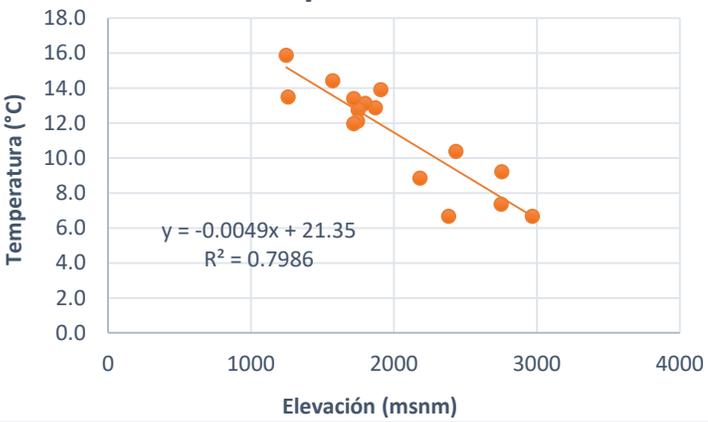
Temperatura mínima promedio julio



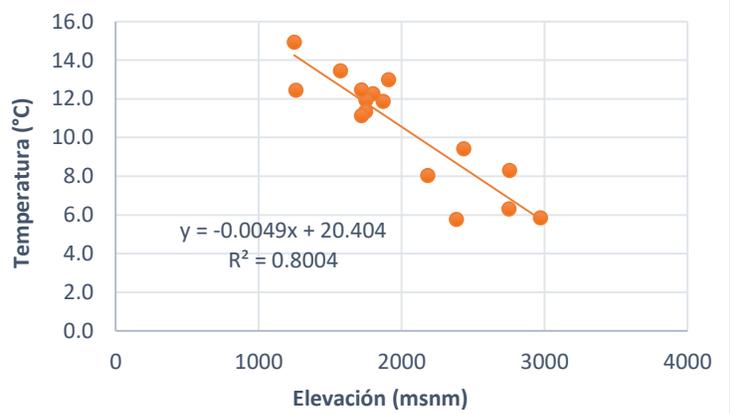
Temperatura mínima promedio agosto



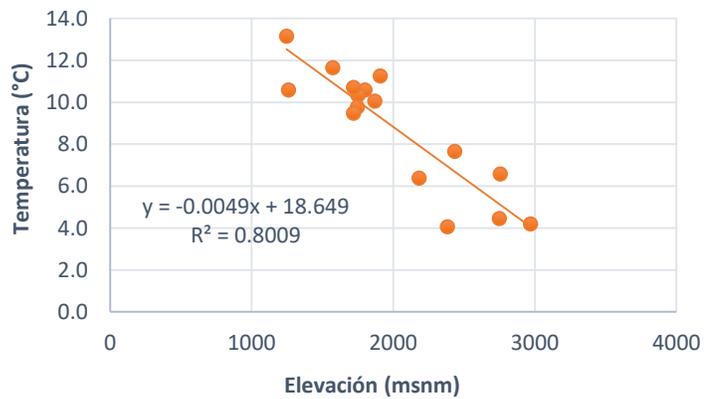
Temperatura mínima promedio septiembre



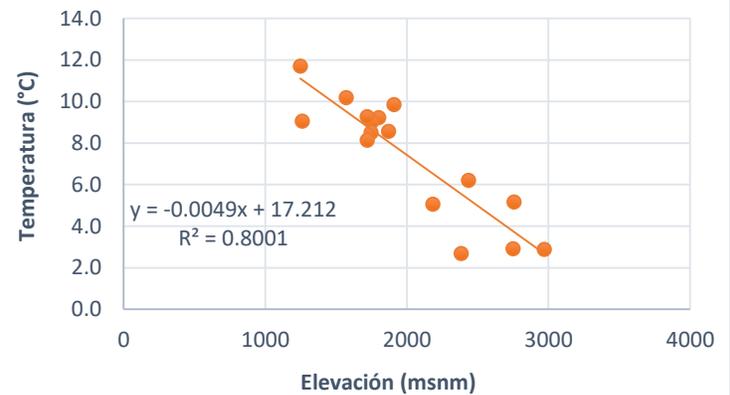
Temperatura mínima promedio octubre



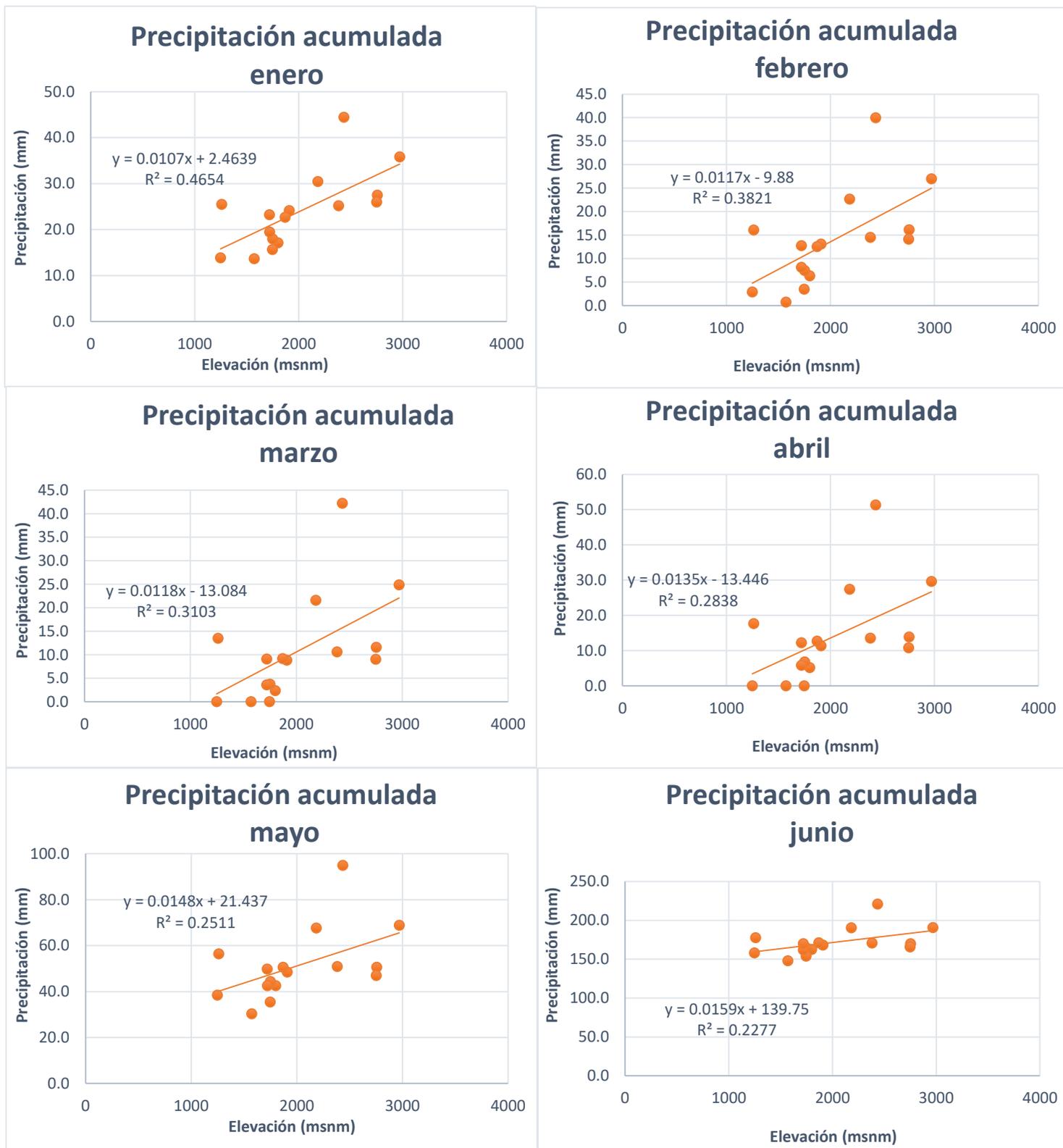
Temperatura mínima promedio noviembre



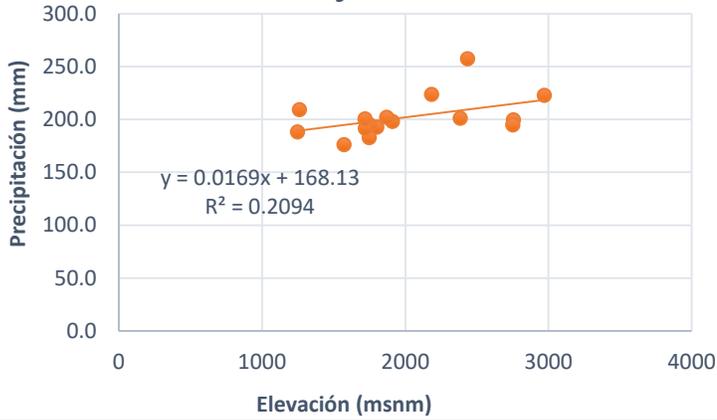
Temperatura mínima promedio diciembre



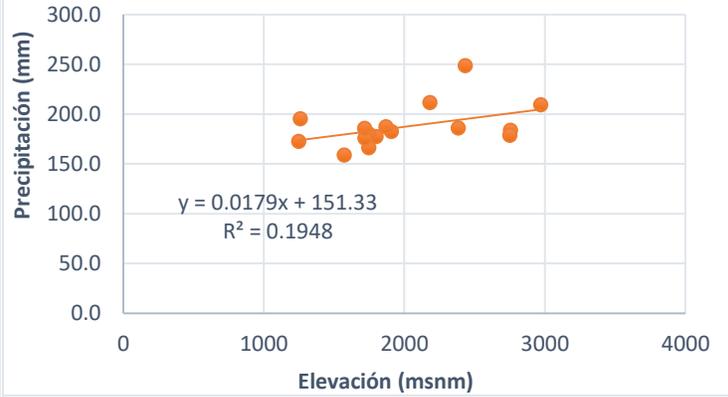
Anexo 4: Correlación entre la altitud y la precipitación acumulada promedio mensual.



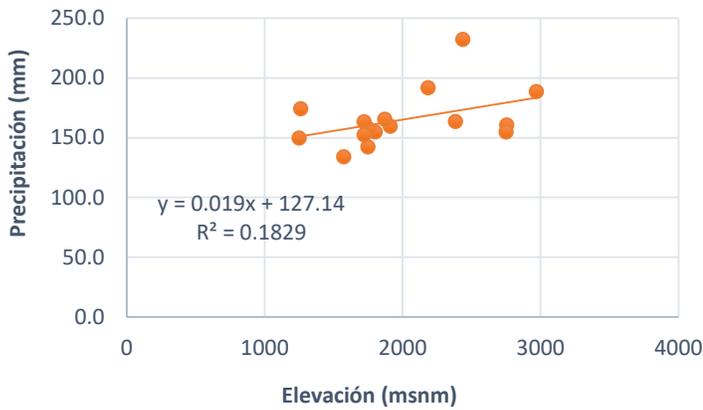
Precipitación acumulada julio



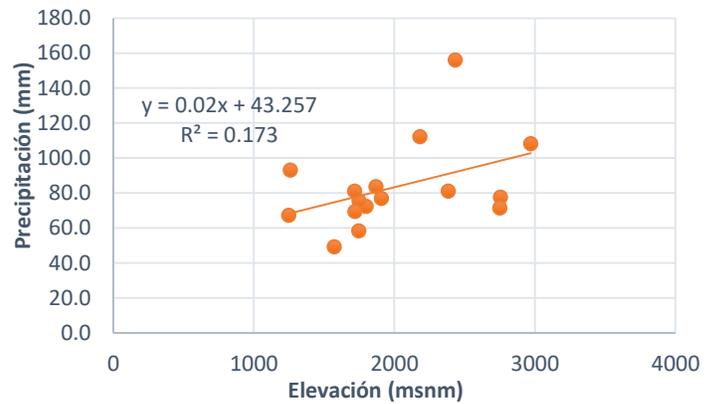
Precipitación acumulada agosto



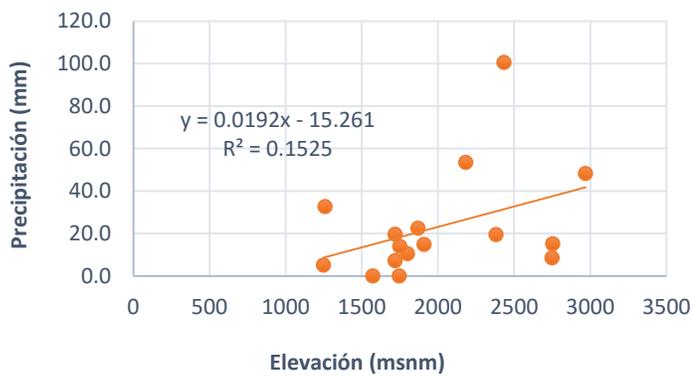
Precipitación acumulada septiembre



Precipitación acumulada octubre



Precipitación acumulada noviembre



Precipitación acumulada diciembre

