

POTENCIAL PRODUCTIVO AGRÍCOLA Y MODELACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL PAPALOAPAN

AGRICULTURAL PRODUCTION POTENTIAL AND MODELING OF CLIMATE CHANGE IN THE PAPALOAPAN BASIN

Ariadna Isabel **Barrera-Rodríguez**¹; Adán Guillermo **Ramírez-García**²; Elvia Nereyda **Rodríguez-Sauceda**³ y Anastacio **Espejel-García**^{4*}

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue realizar una propuesta de uso potencial del suelo y la proyección de escenarios de cambio climático en la cuenca Papaloapan, utilizando la técnica de análisis multicriterio y multiobjetivo para generar aptitudes potenciales en la cuenca. A partir de la aptitud mayor se generaron los escenarios usando la metodología para Máxima Entropía. Se delimitó la región hidrológica a través de material cartográfico y se obtuvo información climática de las estaciones meteorológicas, la información geográfica y bases de datos se recolectaron de fuentes secundarias oficiales, la información

se procesó en el programa ArcGIS versión 10.2.2, para obtener las geodatabases y matrices geoespaciales que sirvieron de insumo cartográfico para el análisis multicriterio. Con base en las matrices geoespaciales y datos vectoriales se generaron datos ráster, mismos que se emplearon en la modelación con algoritmos geo estadísticos y a partir de un lenguaje estructurado se identificaron las zonas potenciales. El resultado de la modelación respecto a la aptitud del suelo generó dos clases con seis niveles de aptitud: tierras para cultivos básicos y para el cultivo de especies de

¹ Profesor Investigador Universidad Autónoma Chapingo, México, Texcoco. <https://orcid.org/0000-0001-7352-109>. abarrerar@chapingo.mx

² Profesor Investigador Universidad Autónoma Chapingo, México, Ciudad Obregón. <http://orcid.org/0000-0002-1711-5942>. gramirezg@taurus.chapingo.mx

³ Profesor Investigador Universidad Autónoma Indígena de México, México, Los Mochis. <https://orcid.org/0000-0002-5672-664X>. elviaro@uaim.edu.mx

⁴ Profesor Investigador Universidad Autónoma Chapingo, México, Texcoco. <https://orcid.org/0000-0002-6462-6681>. aespejlg@chapingo.mx. *Autor de correspondencia

importancia industrial y dos escenarios de cambio climático, actual y futuro.

Palabras clave: aptitud, máxima entropía, ponderación, zonificación agroecológica.

Abstract

The objective of this work was to make a proposal for potential land use and the projection of climate change scenarios in the Papaloapan basin, using the multi-criteria and multi-objective analysis technique to generate potential capabilities in the basin. From the greatest aptitude, the scenarios were generated using the methodology for Maximum Entropy. The hydrological region was delimited through cartographic material and climatic information was obtained from meteorological stations, geographic

information and databases were collected from official secondary sources, the information was processed in the ArcGIS version 10.2.2 program, to obtain the geodatabases and geospatial matrices that served as cartographic input for the multi-criteria analysis. Based on the geospatial matrices and vector data, raster data were generated, which were used in the modeling with geo-statistical algorithms and potential zones were identified from a structured language. The result of the modeling regarding the suitability of the soil generated two classes with six levels of suitability: land for basic crops and for the cultivation of species of industrial importance and two climate change scenarios, current and future.

Key words: aptitude, maximum entropy, weighing, agroecological zoning.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una modificación en los patrones generales de circulación de la atmósfera que provocan alteración de los ciclos naturales y los patrones climáticos del planeta y cuyos efectos escalan sobre territorios, la sociedad y las actividades socioeconómicas y es, actualmente, uno de los retos más importantes que enfrenta la humanidad (Piña, 2019). La agricultura, como actividad prioritaria para el ser humano, no escapa del fenómeno y es considerado uno de los sectores más vulnerables y urge tomar medidas de para hacer frente a un escenario de escasez de agua, incremento en la temperatura global, afectaciones a la biodiversidad local y global, efectos que traerán consigo alteraciones en la producción de alimentos para las familias (Lozano, Álvarez y Moggiano, 2021).

Aunado a lo anterior, algunos efectos secundarios del cambio climático serán la aparición de insectos que alteran los ciclos productivos y rendimientos de los cultivos, crecimiento de las malezas, disminución de los rendimientos y disminución de la oferta de alimentos alterando la seguridad alimentaria de la población mundial (Herrera, 2020). En orden de minimizar los efectos del cambio climático, los expertos señalan que algunas acciones de mitigación y adaptación se deben impulsar desde la política pública y las organizaciones de la sociedad civil (Prosser, et al., 2021) y se proponen realizar estudios a diferentes escalas espaciales (Pereira, 2017). Sin embargo, antes de siquiera pensar en proyectar

acciones de mitigación y adaptación entre la sociedad es necesario realizar una evaluación de la vulnerabilidad y vitalidad de los sistemas humanos y biológicos.

La evaluación, de acuerdo con Nuñez, et al. (2018) incluye tres fases: diagnóstico, modelo conceptual y validación; el diagnóstico reconoce la importancia, la magnitud del problema y la sensibilidad de los sistemas humanos y la influencia en la naturaleza ante los cambios por venir; el modelo conceptual parte del conocimiento teórico existente y de las experiencias del entorno reconociendo las identidades de las regiones (Martínez-Salgado, et al. 2020); y, finalmente, la validación es poner en práctica los modelos teóricos ante escenarios de impactos y determinar la eficiencia en dichas regiones para proponer soluciones con alcance espacial más abarcativo.

El termino de agricultura sustentable se conceptualiza como un sistema productivo de alimentos que debe garantizar una manutención en el largo plazo en el uso de recursos naturales y de la productividad agrícola (Bezerra y Veiga, 2000). Ehlers (1996) sostiene que la agricultura es un conjunto de prácticas agrícolas con un método y con un objetivo, que pueden ser alcanzados con distintas técnicas cuando se agregan a un ambiente con características agroecológicas idóneas; Bezerra y Veiga (2000) consideran que las actividades agrícolas para ser sustentables, deben proporcionar impactos mínimos al ambiente y obtener una producción adecuada de alimentos con los recursos naturales disponibles en el ecosistema. Para obtener buenas cosechas solo debe ser considerado un soporte máximo de producción y un uso adecuado de la tierra, como primer paso a la productividad (Manzatto, 2002).

El uso inadecuado de los suelos ha ocasionado una disminución de la fertilidad hasta en el 80% del territorio nacional; 29 de las 37 regiones hidrológicas del país sufren efectos acumulados de contaminación provocando la reducción de la productividad del suelo causado por el manejo inadecuado de los recursos naturales, los cuales difícilmente podrán ser recuperados en el corto plazo. Como estrategia nacional se busca un equilibrio global y regional entre los objetivos económicos, sociales y ambientales de forma tal que se logren contener los procesos de deterioro ambiental, tomando en cuenta que el desarrollo sea compatible con las aptitudes y capacidades ambientales de cada región; aprovechando de manera sustentable todos los recursos naturales disponibles como condición básica para la superación de la pobreza, cuidado del ambiente y de los recursos naturales (Política Ambiental para un crecimiento Sustentable, 2005).

Estudios recientes sobre calidad de suelos, buscan establecer indicadores de productividad y conservación midiendo por separado propiedades biológicas, físicas y químicas. Con la visión integral, el análisis del potencial productivo de la cuenca se basa en modelos sintéticos y analíticos que permiten sectorizar áreas con fertilidad potencial (Zúñiga *et al.*, 2009).

La modelación de la aptitud para el uso de la tierra es el primer paso para una planeación sustentable del aprovechamiento de los recursos de las cuencas hidrológicas, ya que al utilizar el suelo de acuerdo con su aptitud potencial permite alcanzar el mayor equilibrio entre los factores ambientales, económicos y sociales (Young, 1995). El análisis de la distribución espacial de las propiedades del suelo es fundamental para un manejo adecuado de la tierra; existen varias metodologías para la clasificación de la aptitud, siendo la de Zonificación Agroecológica (FAO, 1977), retomando a Santiago (2005) el instrumento metodológico rector y más completo. La clasificación de tierras no determina por sí sola los cambios que deberán adoptarse en el uso de la tierra, sin embargo, brinda los datos a partir de los cuales se llega a la toma de decisiones y su eficiencia se muestra en los resultados de clasificación de la aptitud potencial del uso del suelo. Se ha comprobado que los mapas pueden proporcionar indicadores para las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, para grupos de agricultores e investigadores, sobre las prácticas adecuadas para la experimentación y modelación (Doorman, 1991).

Los SIG permiten coleccionar, actualizar, almacenar, analizar, desplegar y distribuir datos espaciales e información, que finalmente se presentan en formato tabular y en mapa, generando cálculos con una mayor precisión y confiabilidad (Bolstad, 2005). Aunque existe una metodología ya definida mediante la cual se determina el nivel de aptitud de la cuenca y se definen las zonas de uso potencial agrícola, no existe una ponderación universal, siendo así que en la asignación de las calificaciones o ponderaciones de las variables influye la experiencia y el sustento/revisión bibliográfica de investigador, de ahí parte la calidad de las matrices de ponderación. A partir de este planteamiento el objetivo de esta investigación fue utilizar los SIG como apoyo para la estimación del potencial del suelo y evaluar el efecto del cambio climático sobre el ecosistema en municipios seleccionados de la cuenca Papaloapan. El modelado del nicho ecológico es un instrumento que permite analizar los factores ecológicos asociados a distintas poblaciones de determinada especie, Martínez, (2010); se utiliza para predecir áreas de distribución de las especies, (Martínez, 2012). Los modelos de distribución son de esencial importancia para la evaluación del efecto del cambio climático sobre las especies y ecosistemas (Dormann, 2007) y generar un plan de manejo e identificar las acciones que se deben realizar para el uso eficiente de los recursos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

Se seleccionó la cuenca del Papaloapan que comprende 279 municipios localizados en el centro-sur de Veracruz, sureste del estado de Puebla y el centro-norte de Oaxaca, Figura 2.



Figura 2. Municipios considerados en el análisis de la cuenca Papaloapan.

La delimitación de zonas con potencial agrícola para una región implica ventajas en el manejo de los cultivos ya que producir una especie fuera de su ambiente óptimo encarece las tecnologías de producción o bien simplemente reduce el rendimiento por las condiciones ambientales, ecológicas y edafológicas (Ruiz y Flores, 1995). La selección de áreas se realiza mediante la sobre posición de algebra de mapas, realizada a través de sistemas de información geográfica (Eastman, 1993).

Definición de variables

Se consideraron once variables para la modelación del potencial: Periodo de crecimiento, Temperatura, Precipitación, Suelo, Textura, Altitud, Pendiente, Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Materia orgánica y concentración de iones hidrogeno en el suelo (Ph). Los datos meteorológicos se extrajeron del software Eric III (Extractor Rápido de Información Climática) en su versión 3.2. En la cuenca Papaloapan se tienen 296 estaciones meteorológicas Figura 3, solo 192 cumplieron con los datos históricos (2003-2013).



Figura 3. Ubicaciones de las estaciones meteorológicas.

Con el cálculo y simplificación de datos, se obtuvieron los siguientes insumos:

Temperatura media anual (°C). Son valores que se obtienen a partir del promedio de las temperaturas medias registradas en cada uno de los doce meses del año, Figura 3.

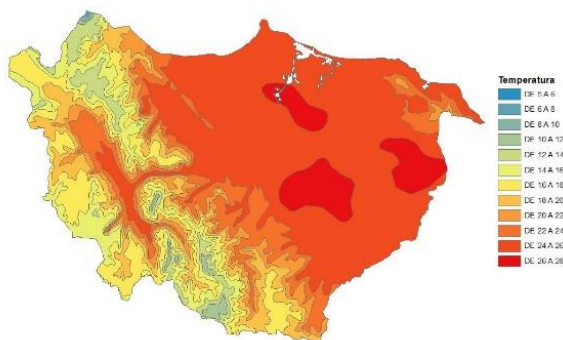


Figura 4. Temperatura media anual de la cuenca Papaloapan.

Precipitación anual en mm (Isoyetas). Se obtuvieron al calcular la precipitación promedio en cuenca, analizando las series de datos disponibles, se realizó por el método de isoyetas la cual proporciona una distribución discontinua de la lluvia sobre la cuenca y considera una distribución homogénea dentro de cada polígono, Figura 5. El valor de la precipitación anual en la cuenca, se obtuvo a partir de la siguiente expresión.

$$D = \frac{\sum_i^n a_i \cdot D_i}{A}$$

Donde:

a_i = área entre cada dos isoyetas

D_i = promedio de precipitación entre dos isoyetas

En esto se basa para ponderar el valor de la variable climática en cada estación en función de un área de influencia.



Figura 5. Precipitación anual de la cuenca Papaloapan.

Edafológica, escala 1:1'000'000. Son datos que determinan las propiedades del suelo y que de acuerdo a los grupos de cultivos de interés reciben diferente nivel de importancia: Profundidad (cm) los pesos están en función del movimiento radicular; suelo dominante (Fase /Descripción) los pesos están en base al uso deseado y Textura (Arcillas, Limos y Arenas) están en función de la capacidad del ciclaje de nutrientes y la capacidad de intercambio catiónico ponderado con respecto al óptimo de cada cultivo.

Modelo de Elevación Digital (DEM), tamaño de celda = 50; de CONABIO, escala 1:1'000'000 para determinar mediante el software ArcGIS dos parámetros: Altitud y Pendientes (%) que en conjunto dan la condición actual de ladera, Figura 7.

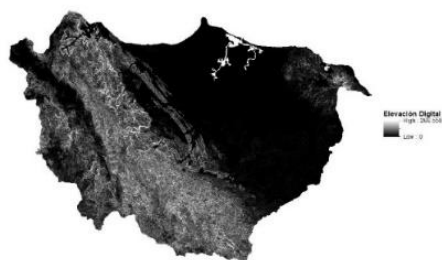


Figura 6. Mapa de altitud de la cuenca Papaloapan (msnm).

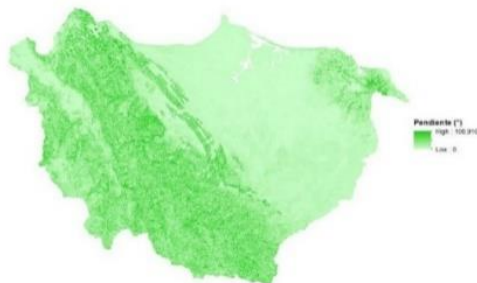


Figura 7. Mapa de pendientes (%).

Perfiles de suelo para determinar los parámetros a través de análisis geo estadístico: a) Nitrógeno (N), b) Fosforo (P), c) Potasio (K), d) Materia Orgánica (MO), y e) Potencial Hidrogeno (pH), siendo los primeros 4 determinados en Kg/ha a través del método de interpolación IDW (Interpolación mediante distancia inversa) con la ayuda del software ArcGIS 10.2.2, como se muestra en la Figura 7.

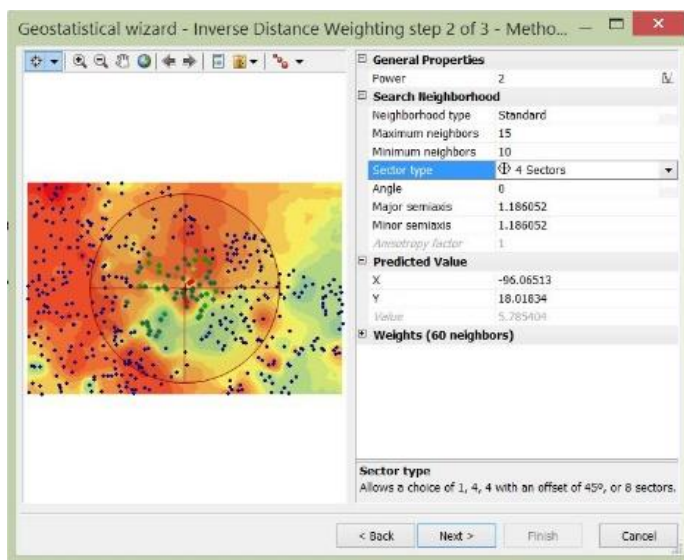


Figura 8. Interfaz de interpolación de los parámetros en ArcGIS 10.2.2.

Los requerimientos agroecológicos de los cultivos se determinaron en función de las fichas técnicas de INIFAP, para Cultivos Básicos y Uso Industrial.

Análisis multicriterio y multiobjetivo

Con el uso de la técnica multicriterio se generaron matrices de ponderación utilizando el método de Scoring (Roche y Vejo, 1998), el cual simplifica la asignación de ponderación, identificando de manera sencilla la alternativa preferible, utilizando una escala de 5 a 0, generando así 6 niveles de aptitud: Muy apto (80-100%), Apto (60-80%), Moderadamente apto (40-60%), Poco apto (20-40%), Muy poco apto (5-20%) y No Apto (0-5%), donde cinco es el nivel mayor de aptitud (Muy apto) y cero identifica el nivel mínimo (No apto). Este procedimiento se aplicó a las once variables, y se generaron matrices para las dos clases de cultivos propuestas, las cuales se muestran en las Tablas 1 y 2.

Se utilizó la metodología de FAO (1977), la cual propone para definir zonas con alto potencial productivo, con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos, edáficos y manejo bajo los que éstos se desarrollan. Cada zona (clase) tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras, y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras (Calderón, 2015). Se construyeron las matrices de ponderación y se dividieron las once variables en tres categorías: agronómicas y nutrimentales, edafológicas y climáticas, con la finalidad de resaltar los atributos con los que se trabajaría la modelación para estimar el potencial productivo.

Tabla 1. Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial para cultivos básicos

Variables Agronómicas/Nutrimentales									
N		P		K		Materia orgánica		Ph	
Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	%	Peso		Peso
>283	5	>125	5	>291	5	<0.6	0	<4.6	1
226.4-283	4	100-125	4	232.8-291	4	.6-1.2	1	5.0-6	3
169.8-226.4	3	75-100	3	174.6-232.8	3	1.2-1.8	2	6--6.8	4
113.2-169.8	2	50-75	2	116.4-174.6	2	1.8-2.4	3	6.8-7.2	5

56.6-113.2	1	25-50	1	58.2-116.4	1	2.4-3	4	7.2-7.7	3
<56.6	0	<25	0	<58.2	0	>4.2	5	>9.4	0

Variables Edafológicas

Suelo		Textura		Altitud		Pendiente	
Tipo	Peso	Tipo	Peso	Msnm	Peso	%	Peso
Fluvisol	5	Arcillas Limos Arenas	4	0-1000	5	>100	0
Luvisol	4		5	1000-1500	5	75-100	1
Andosol	3		3	1500-2000	5	35-75	2
Rendzina	2			2000-2500	5	20-35	3
Regosol	1			2500-3000	4	10.0-20	4
Gleysol	0			>3000	3	<10	5

Variables Climáticas

Periodo de crecimiento		Temperatura		Precipitación	
Rango	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso
240-180	5	27-30	4	2500-3000	1
180-150	4	20-27	5	2000-2500	2
150-120	3	18-20	3	1500-2000	5
120-90	2	15-18	2	1000-1500	4
90-60	1	10.0-15	1	1000-500	3
<60	0	<10	0	>500	0

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se asignaron ponderaciones a las variables, dependiendo de la clase de aptitud a trabajar. Para la ponderación de las zonas con aptitud potencial en cultivos básicos, se agruparon los requerimientos del maíz, frijol, cebada, trigo, avena y sorgo, para generar la matriz que detectara las zonas potenciales para los estos cultivos.

Tabla 2. Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial para cultivos de importancia industrial

Variables Agronómicas/Nutrimientales									
N		P		K		Materia orgánica		Ph	
Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	%	Peso	Peso	
>375	5	>100	5	>600	5	<0.6	0	<4.6	1
260-325	4	80-100	4	480-600	4	.6-1.2	1	5.0-6	3
195-260	3	60-80	3	360-480	3	1.2-1.8	2	6--6.8	4
130-195	2	40-60	2	240-360	2	1.8-2.4	3	6.8-7.2	5
65-130	1	20-40	1	120-240	1	2.4-3	4	7.2-7.7	3
<65	0	<20	0	<120	0	>4.2	5	>9.4	0
Variables Edafológicas									
Suelo		Textura		Altitud		Pendiente			
Tipo	Peso	Tipo	Peso	Msnm	Peso	%	Peso		
Fluvisol	5	Arcillas	4	0-1000	5	>100	0		
Luvisol	4	Limos	5	1000-1500	4	75-100	1		
Planosol	3	Arenas	3	1500-2000	5	35-75	2		
Rendzina	2			2000-2500	3	20-35	3		
Regosol	1			2500-3000	2	10.0-20	4		
Gleysol	0			>3000	1	<10	5		
Variables Climáticas									
Periodo de crecimiento		Temperatura		Precipitación					
Rango	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso				
240-180	3	27-30	5	2500-3000	3				
180-150	4	20-27	4	2000-2500	4				
150-120	5	18-20	3	1500-2000	5				
120-90	3	15-18	2	1000-1500	4				

90-60	2	10.0-15	1	1000-500	2
<60	1	<10	0	>500	1

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la elaboración de la matriz de ponderación para cultivos de importancia industrial se agruparon los requerimientos del café, caña de azúcar, algodón, té, tabaco y stevia, determinando las zonas potencialmente aptas para su producción dentro de la cuenca Papaloapan. Una vez generados los insumos para la modelación de las cuatro clases de cultivos propuestas, se continuo con el procesamiento de los datos en el software especializado ArcGIS 10.2.2, para la elaboración de mapas, Tabla 2.

Modelación de escenarios de Cambio Climático con Máxima Entropía (MAXENT)

Para la modelación espacial de los escenarios tendenciales se utilizaron datos bioclimáticos y se procesaron en el software MAXENT¹. Los datos fueron obtenidos del sitio web WorldClim, 2015. Para este proyecto solos se utilizaron las capas de las categorías “Current” y “Future” para la modelación de escenarios de cambio climático del territorio, el software cuenta con 19 variables disponibles, las cuales están definidas de siguiente manera (UNIATMOS, 2015):

BIO1. Temperatura Media Anual (°C) = $\frac{\sum_{i=1}^{12} tmax_i}{12} + \frac{\sum_{i=1}^{12} tmin_i}{12}$, en cada estación meteorológica.

BIO2. Temperatura Diurna = $\frac{\sum_{i=1}^{12} tmax_i}{12} - \frac{\sum_{i=1}^{12} tmin_i}{12}$, en cada estación meteorológica.

BIO3. Isotermas) = $\left(\frac{\text{Rango de Temperatura Diurna}}{\text{Rango de Temperatura anual}} \right) 100$, en cada estación meteorológica.

BIO4. Temperatura Estacional = $^2\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (tmed_1 - \overline{tmed})^2}{N}} \cdot 100$, en cada estación meteorológica

BIO5. Temperatura Máxima del mes más Cálido (°C) = De las 12 climatologías mensuales de temperatura máxima, se elige el valor más alto por estación meteorológica.

BIO6. Temperatura Mínima del mes más Frio (°C) = De las 12 climatologías mensuales de temperatura mínima, se elige el valor más bajo por estación

¹ MAXENT (por sus siglas en inglés Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions) es la Modelación de Máxima Entropía de la Distribución Geográfica de Especies.

² σ = Desviación Estándar de la Temperatura Media Mensual

BIO7. Rango de Temperatura Anual (°C) = Temperatura máxima del mes más cálido - Temperatura mínima del mes más frío, en cada estación meteorológica.

BIO8. Temperatura Media del Trimestre más Húmedo (°C) = $\frac{Tmax_1 + Tmax_2 + Tmax_3}{3} + \frac{Tmin_1 + Tmin_2 + Tmin_3}{3} / 2$, en cada estación meteorológica.

BIO9. Temperatura Media del Trimestre más Seco (°C) = $\frac{Tmax_1 + Tmax_2 + Tmax_3}{3} + \frac{Tmin_1 + Tmin_2 + Tmin_3}{3} / 2$, en cada estación meteorológica.

BIO10. Temperatura Media del Trimestre más Cálido (°C) = $\frac{Tmax_1 + Tmax_2 + Tmax_3}{3} + \frac{Tmin_1 + Tmin_2 + Tmin_3}{3} / 2$, en cada estación meteorológica.

BIO11. Temperatura Media del Trimestre más Frío (°C) = $\frac{Tmax_1 + Tmax_2 + Tmax_3}{3} + \frac{Tmin_1 + Tmin_2 + Tmin_3}{3} / 2$, en cada estación meteorológica.

BIO12. Precipitación Anual (mm) = $\sum_{i=1}^{12} prec_i$, en cada estación meteorológica.

BIO13 = Precipitación del mes más Húmedo (mm) = De las 12 climatologías mensuales de precipitación, se elige el valor más alto por estación meteorológica.

BIO14 = Precipitación del mes más Seco (mm) = De las 12 climatologías mensuales de precipitación, se elige el valor más bajo por estación meteorológica.

BIO15 = Precipitación Estacional (Coeficiente de Variación) = $\left(\frac{{}^3\sigma (prec_1, \dots, prec_{12}) * 100}{1 + \left(\sum_{i=1}^{12} prec_i / 12 \right)} \right)$

BIO16 = Precipitación del Trimestre más Húmedo (mm) = $prec_1 + prec_2 + prec_3$, en cada estación meteorológica

BIO17 = Precipitación del Trimestre más Seco (mm) = $prec_1 + prec_2 + prec_3$, en cada estación meteorológica

BIO18 = Precipitación del Trimestre más Cálido (mm) = $prec_1 + prec_2 + prec_3$, en cada estación meteorológica

BIO19 = Precipitación del Trimestre más Frío (mm) = $prec_1 + prec_2 + prec_3$, en cada estación meteorológica

Con estas capas (BIO1, BIO2,..., BIO19) de información se generaron los mapas y se realizó la modelación con el Software ArcGIS versión 10.2.2 donde se trabajaron los archivos y se desplegaron las coberturas en formato Raster para poder efectuar las proyecciones y transformaciones necesarias para la obtención de los escenarios de cambio climático actuales y futuros para la aptitud potencial de cultivos básicos y de importancia industrial, Figura 9.

³ σ = Desviación Estándar de la Precipitación Media Mensual



Figura 9. Cobertura Global (Ej. BIO 1. Temperatura Media Anual) de BIOCLIM.

Posteriormente se cortaron todas las coberturas Raster con el fin de minimizar tamaño de los archivos y su extensión también se minimizó el proceso de modelado dentro del software MAXENT, se realizó la extracción del área correspondiente a la cuenca Papaloapan, debido a que las coberturas de BIOCLIM se presentan a escala global, Figura 10.

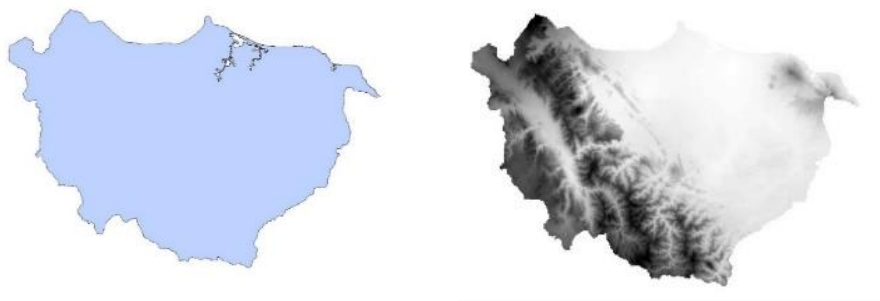


Figura 10. Shapefile para corte, y salida en formato ASCII⁴ de la Temperatura Media Anual.

Se realizó la conversión del Raster tipo grid hacia el Raster en formato de texto ASCII. Se realizó la conversión para los archivos de Precipitación y Temperatura en las categorías PRESENTE y FUTURO. Teniendo el archivo en

⁴ ASCII (por sus siglas en inglés American Standard Code for Information Interchange) es el Código Estadounidense para el Intercambio de información

formato ASCII de la cuenca se procedió a preparar los puntos a los cuales se les realizó el modelo de distribución, Figura 10.

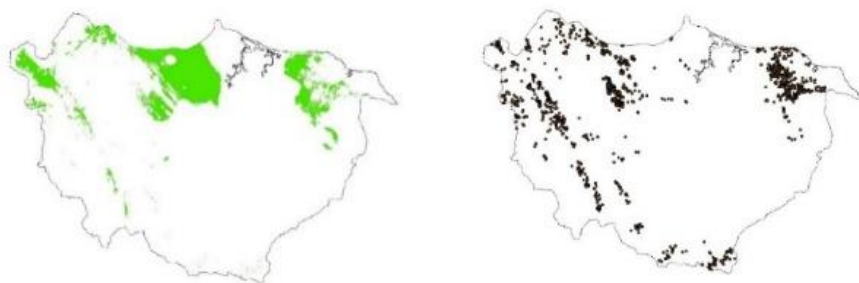


Figura 11. Potencial más alto y puntos georreferenciados generados.

Modelación de variables en MAXENT para obtener escenarios de distribución actuales y futuros de Cambio Climático

Para el modelado de distribución de especies se consideraron dos fuentes de entrada de datos para la generación de modelos de distribución basados en nichos, presencia/ausencia de la especie o sólo la presencia de datos y un conjunto de variables ambientales relevantes (Cruz, *et al.*, 2014), en esta investigación se utilizaron las variables obtenidas de la plataforma WorldClim para generar escenarios de distribución de especies frente al Cambio Climático. Así como las aptitudes potenciales para cultivos básicos y de importancia industrial en la cuenca Papaloapan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas del potencial agrícola resultantes de la cuenca Papaloapan se presentan en las Figuras 11 y 14, mientras que sus escenarios de cambio climático se muestran en las figuras 12, 15 (actual) y 13, 16 (Futuro).

Cultivos básicos

La modelación multicriterio generada con el programa ArcGIS 10.2.2 registró que la cuenca presenta tres niveles de aptitud (apto, moderadamente apto y muy

poco apto) lo cual significa que en esta cuenca existen condiciones idóneas para obtener un porcentaje de producción correspondiente al 80%, 60% y 20% respectivamente. El potencial **apto** se encuentra en zonas de la región oeste y algunas de la región sur de la cuenca en donde existen pendientes no mayores a 10%, los suelos dominantes son ricos en nutrientes como el Ca, Mg, P, K y N y en materia orgánica, el color de suelo es oscuro y su profundidad promedio es de 50 centímetros. La mayor superficie con potencial apta para el cultivo de granos básicos se encuentra ubicada desde la franja formada en la región centro-norte-este de la cuenca de estudio, el total de superficie con esta aptitud es del 30.2%.

El potencial considerado como moderadamente apto se encuentra distribuido prácticamente por toda la superficie de la cuenca, siendo esta categoría la de mayor superficie, se ubica en zonas donde las pendientes son mayores a un 20% de inclinación del terreno y los suelos dominantes son muy delgados, menores a 10 cm en general, la fertilidad de esta zona es limitada en nutrientes y con alta presencia de carbonatos, en las zonas más secas el pH tiende a la alcalinidad, mientras en los sitios de mayor altitud se pueden encontrar suelos ácidos por efecto de las lluvias con gran cantidad de oxidación de nutrientes, el color del suelo es claro y rojizo, donde la arcilla se ha depositado en los estratos del subsuelo (INEGI, 2004), la distribución de esta clase de potencial se extiende en dos zonas, la primera en la parte norte-este de la cuenca y la segunda en la parte centro-oeste-sur, justo entre las dos zonas de la potencialidad apta, la superficie total corresponde a un extensión del 69.3%.

El potencial muy poco apto se ubica en la parte centro sur y centro sureste de la cuenca, también se encuentra en algunas zonas al norte y al este de la cuenca, en menor proporción. Las limitaciones de impulsar zonas aptas para agricultura de cultivos básicos en este lugar son básicamente que los terrenos se encuentran en zonas con pendientes pronunciadas, donde el valor mínimo es de 75%, lo cual no permite la adopción de maquinaria, los suelos de esta zonas son, aunque profundos (hasta 120 cm), presentan fertilidad baja de acuerdo al INEGI (2004) por lo cual los rendimientos pueden ser de bajos a moderados, la precipitación que corresponde a esta área fluctúa entre los 2000 mm y 2500 mm anuales, la disposición de humedad del suelo va de los 90 a los 120 días, como consecuencia de las temperaturas dominantes en estas zonas de la cuenca hacen mínima la posibilidad de establecer cultivos básicos, la cual oscila entre los 10°C y 15°C, la superficie total que corresponde a este potencial es de 0.5%, Figura 11.

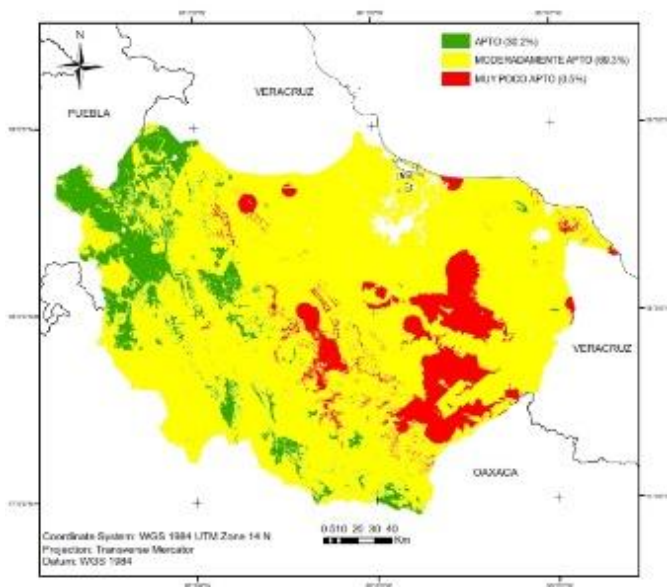


Figura 11. Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de cultivos básicos.

Para las zonas potenciales en cultivos básicos, se modeló la mayor aptitud para el establecimiento de cultivos básicos que representa el 30.2% de la cuenca; con la transformación de las zonas a puntos, con el software MAXENT se modelaron estos puntos para identificar condiciones (climáticas) y generar coincidencias para delimitar zonas potenciales en modelos de cambio climático actuales y proyectadas a 50 años y generar una aproximación al comportamiento que tendrán estas zonas en un futuro y así apoyar el proceso de la toma de decisiones, sobre la sostenibilidad y sustentabilidad, así como la importancia de dichas áreas a través del tiempo, Figuras 12 y 13.



Figura 12. Modelación de Máxima Entropía para zonas con potencial de riego (Actual).

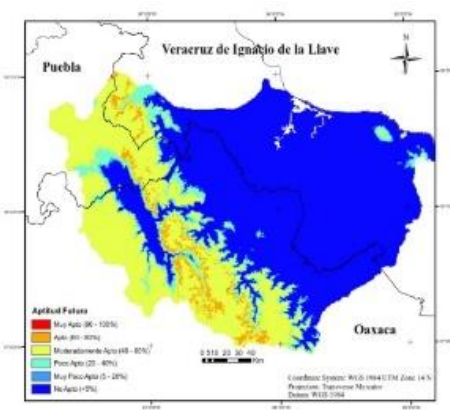


Figura 13. Modelación de Máxima Entropía para zonas con potencial de riego (Futuro).

Usando la modelación de máxima entropía se generan rangos de aptitud que van en un intervalo de 0 a 1, donde 0 (0%) se interpreta como no apto y 1 (100%) como apto (azul a rojo respectivamente), en el caso de las zonas para cultivos básicos la máxima aptitud equivale al 67% en las condiciones climáticas actuales, mientras que en condiciones futuras la aptitud aumentará a 70%. Mediante los mapas se puede apreciar claramente la disminución de zonas aptas, así como su desaparición en el este de la cuenca, concentrándose hacia el oeste las zonas de aptitud.

Cultivos de importancia industrial

La estrategia agrícola debe considerar explorar las zonas potenciales para el establecimiento de cultivos industriales con el objetivo de fomentar el desarrollo agroindustrial de las cuencas hidrológicas y aprovechar los recursos naturales disponibles para mejorar su capacidad productiva y beneficiar a la sociedad en su conjunto, derivado del análisis multicriterio se obtuvieron tres tipos de potenciales (apto, moderadamente apto y muy poco apto); el potencial **apto** se ubica en algunas porciones del norte, noroeste y noreste de la cuenca, caracterizado por contar con suelos de texturas intermedias y estructura tipo porosas (INEGI, 2004), el contenido de materia orgánica es superior del 4.2 %, el pH del suelo es neutro con valores del 6.8-7.2, el reservorio de nutrientes del suelo es alto, el nitrógeno se encuentra por arriba de los 375 kg/ha, el Fosforo es

de 100 kg/ha y el Potasio no es limitante ya que se encuentra por arriba de los 600 kg/ha, la pendiente de estos suelos es menor al 10% lo que posibilita el uso de maquinaria agrícola, la altitud máxima es menor de 1000 msnm, la temperatura media es de 30°C y el periodo de crecimiento es superior a los 120 días, la superficie total de este potencial es de 1.5%.

El potencial **moderadamente apto** se concentra en la parte noroeste, suroeste, centro-norte-este y en el noreste; este nivel de aptitud se caracteriza por presentar suelos con pendientes entre los rangos del 20%, ligeramente inclinados, pero con posibilidades de ser mecanizados, entre altitudes de 1000 a 1500 msnm, con precipitación promedio de 1000 mm- 1500 mm, con temperatura media de 20°C, los días para el periodo de crecimiento de las plantas son menores a 120 días, la fertilidad del suelo es moderada , el nitrógeno es de 325 kg/ha, el fosforo de 80 kg/ha y el potasio se encuentra en el intervalo de los 480 kg/ha, el contenido de materia orgánica es del orden del 2.4% a 3 % , el pH se encuentra en el rango de los de los 6-6.8, ligeramente ácido (Fernández *et al*, 2006), la superficie total con este potencial es de 18.6%.

El potencial **muy poco apto** se encuentra en la región suroeste, sur-centro-noroeste y noreste. Se caracteriza por tener pendientes muy escarpadas con valores de 75-100%, lo cual impide cualquier uso de tecnología de labranza mecanizada, alturas por arriba de los 3000 msnm, los suelos son delgados y poco profundos, nivel de fertilidad bajo (INEGI, 2004), nitrógeno en el suelo de 65 kg/ha, el fosforo de 40 kg/ha y el potasio que se encuentra en estos suelos en una cantidad de 120 kg/ha, los sitios tiene una precipitación promedio inferior a los 500 mm, y las temperaturas pueden ser de los 10°C a los 15°C y presentarse temperaturas letales menores a los 10°C , con alta posibilidad de heladas, la disponibilidad de agua del suelo es menor de 60 días, la superficie total corresponde al 79.7%, Figura 14.

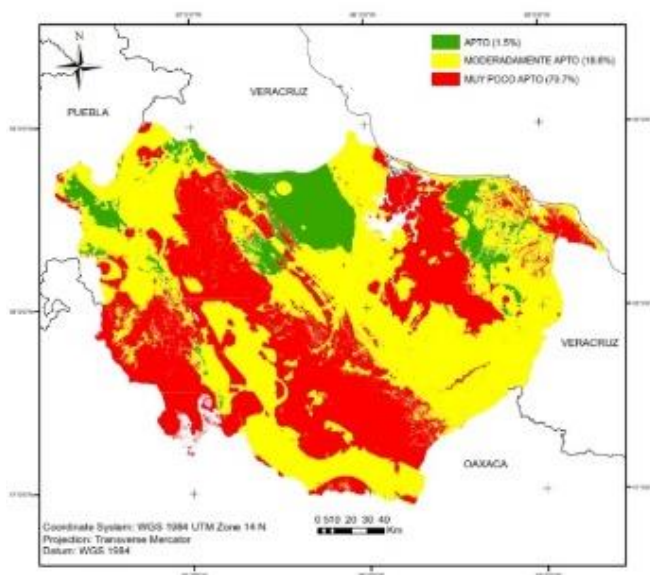


Figura 14. Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de cultivos de importancia industrial.

Para las zonas potenciales de cultivos de importancia industrial, se modeló la mayor aptitud correspondiente al establecimiento de cultivos industriales en la cuenca del Papaloapan la cual representa el 1.5% de la superficie de la cuenca; como resultado de la modelación se identificaron condiciones (climáticas) y se generaron coincidencias para delimitar zonas potenciales en modelos de cambio climático actuales y proyectadas a 50 años para generar una aproximación al comportamiento que tendrán estas zonas en un futuro en términos de sostenibilidad. Usando la modelación de máxima entropía se generan rangos de aptitud que van en un intervalo de 0 a 1, donde cero (0%) se interpreta como no apto y uno (100%) como apto (azul a rojo respectivamente), en el caso de las zonas para cultivos industriales, la máxima aptitud equivale al 78% en las condiciones climáticas actuales y futuras, las condiciones climáticas se mantendrán, lo que permitirá la sostenibilidad de estas zonas en a través del tiempo, se aprecia la disminución en la superficie de zonas aptas, lo cual nos indica que en algunas zonas las condiciones climatológicas afectaran la aptitud de los cultivos industriales, de tal manera que las zonas más susceptibles irán desapareciendo, dejando solo las regiones más aptas para el establecimiento de este grupo de cultivos Figuras 15 y 16.

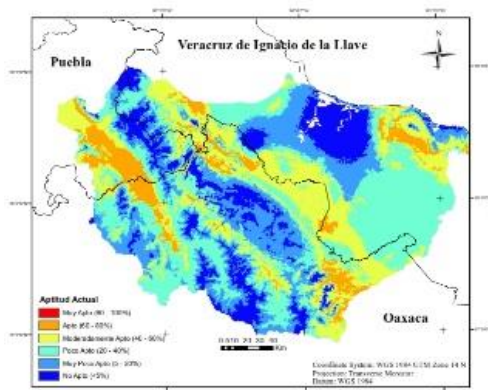


Figura 15. Modelación de Máxima Entropía para zonas con potencial en cultivos industriales (Actual).

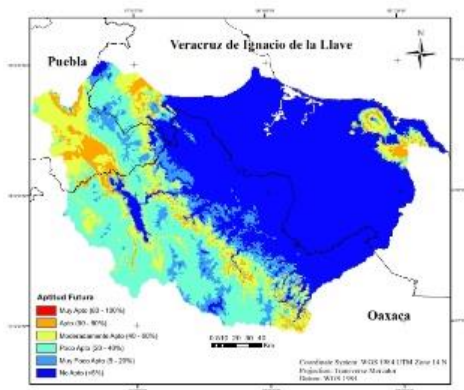


Figura 16. Modelación de Máxima Entropía para zonas con potencial en cultivos industriales (Futuro).

CONCLUSIONES

El uso de la tecnología de análisis espacial es una alternativa como método transversal para explorar las opciones de potencialidades en las cuencas hidrológicas en el sector agrícola, ya que al identificar las zonas ambientales más idóneas para la producción de granos básicos se garantiza la alimentación de la población más vulnerable y se promueve la producción de granos básicos en la cuenca. El modelo sugerido propone la identificación de zonas de riego para impulsar el cultivo de hortalizas como estrategia de apoyo a los pequeños productores de la cuenca. Se identificaron los sitios más adecuados en donde la agroindustria puede impulsarse como estrategia regional, esto conllevaría a la adopción de mejores tecnologías para el sector agrícola e integración de las cadenas agroindustriales y una mayor agregación de valor y riqueza en las regiones. Resulta importante considerar para fines de planeación agrícola regional una tendencia de desplazamiento de las áreas idóneas hacia la región oeste de la cuenca y además la superficie se verá disminuida dadas las condiciones de temperatura y precipitación futuras en 50 años.

LITERATURA CITADA

- Bezerra, M. D. C. L., & Veiga J. E. D. (2000). Agricultura Sustentável. Subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira. Brasília: Ministério do Meio Ambiente 60 p.
- Bolstad, P. (2005). GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems. Eider Press. 30p.
- Calderón, J. (2015). Impactos del cambio climático en el rendimiento potencial de cebada (*Hordeum vulgare*), en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala. Tesis de licenciatura. Texcoco de Mora, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 80 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2015). Portal de geoinformación. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cruz-Cárdenas, G.; Villaseñor, J.; López-Mata, L.; Martínez-Meyer, E. y Ortiz. E. 2014. Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. Rev. Chapingo vol.20 (2): 187-201 pp.
- Dent, D., & Young, A. (1995). Soil survey and land evaluation. George Allen & Unwin. 40 p.
- Díaz-Padilla, G.; Cortina, C. M. F. & Rodríguez, P. L. (2001). Estudio de las Potencialidades Productivas para el Uso del Suelo del Estado de Veracruz. Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campo Experimental Xalapa, INIFAP-Fundación PRODUCE. Xalapa, Ver. México. 120 p.
- Dirección General del Centro de Documentación, Información y Análisis (2005). Política Ambiental para un crecimiento Sustentable” como parte del Plan Nacional de Desarrollo [En Línea]. Mayo 2005. Cámara de Diputados. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/bibliot/publica/otras/pnd/58.htm>
- Doorman, F. J.; Miranda, F., & Doorman, F. (1991). La metodología del diagnóstico en el enfoque Investigación Adaptativa. IICA Biblioteca Venezuela. 45 p.
- Dormann, C. F. (2007). Promising the future? Global change projections of species distributions. Basic and Applied Ecology, 8(5): 387-397 pp.

- Eastman, J. R.; Kyem, P. A.; Toledano, J., & Jin, W. (1993). Explorations in Geographic Systems Technology Volume 4: GIS and Decision Making. UNITAR, Geneva. 200 p.
- Ehlers, E. 1999. Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma. 50 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1997). Zonificación Agro-ecológica: Gua General. Italia. Boletines de suelos de la FAO. 180 p.
- Garnica, J. A. S. (2005). Determinación del uso potencial de la tierra con fines agrícolas en el municipio Bolívar, estado Táchira. *Geoenseñanza*, 10(1): 69-85 p.
- Herrera, C. M. (2020). Los dilemas entre el cambio climático, la dieta saludable/sostenible y la sindemia de las sociedades post-modernas. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 33(1): 76-79.
- Hijmans, R. J., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2016.) WorldClim—global climate data, free climate data for ecological modeling and GIS. 90 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2004). Guías para la interpretación de Cartografía Edafología. INEGI, Aguascalientes. 28 p.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2010). Boletín Informativo para la comunidad del inifap. INIFAP, México D.F. 4 p.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. México. INIFAP. CIRPAC. 60 p.
- Linares, F.; Avelizapa, L. C. R.; Carrillo, N. G. R., & Islas, T. G. R. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados (No. C/631.41 M3). 85 p.
- Lozano-Povis, A., Álvarez-Montalván, C. E., y Mogiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1): 101-108.
- Manzatto, C. V.; Ramalho Filho, A.; Costa, T.; Santos, M.; Coelho, M. R.; Silva, E. D., & Oliveira, R. D. (2002). Potencial de uso e uso actual das terras. *Uso agrícola dos solos brasileiros*, 13-21 p.
- Martínez Ainsworth, N. 2013. El nicho ecológico: útil concepto aún en debate. 11 p.
- Martínez, N. (2010). Apuntes sobre modelación de nichos ecológicos. Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental. 66 p.

- Martínez-Salgado, J. D., Martínez-Barón, D., Leal, M., Castellanos, A. (2020). Actualización del Estado del Arte en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria en Guatemala 2020. Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Núñez, J., Carvajal, J. C., Mendoza, O., y Carrero, D. (2018). Indicadores del impacto del cambio climático en la agricultura familiar andina colombiana. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7): 824-831.
- Pereira, L. (2017). *Climate Change Impacts on Agriculture across Africa*. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Piña, B. C. (2019). Cambio climático, inseguridad alimentaria y obesidad infantil. *Revista Cubana de Salud Pública*, 45(3): 1-18.
- Prosser, B. G., Bonilla, N., Prosser, G. C. y Romo-Medina, I. (2021). Expertos por experiencia en la educación para el cambio climático: emociones, acciones y estrategias desde la perspectiva de participantes de tres programas escolares chilenos. *Revista de estudios y experiencias en educación*, 21(45): 232-251.
- Roche, H., & Vejo, C. (2005). *Análisis multicriterio en la toma de decisiones. Métodos Cuantitativos aplicados a la administración*. 150p.
- Rojas-Palomino, A.; Madero-Morales, E.; Ramírez-Náder, L. M., & Zúñiga Escobar, O. (2009). Índice de potencial productivo del suelo aplicado a tres fincas ganaderas de ladera en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 58(2): 85-90 p.
- Ruiz, C. y Flores, H. (1995). *Áreas con potencial para la producción de frijol en Nayarit*. INIFAP. México. 70 p.
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS). (2016). *Parámetros bioclimáticos (1902-2011). Atlas Climático Digital de México*. http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f_bioclimaticos.html.