

Ra Ximhai

Revista de Paz, Interculturalidad y
Democracia

Ra Ximhai
Universidad Autónoma Indígena de México
ISSN: 1665-0441
México

2015

DETERMINACIÓN DEL USO POTENCIAL AGRÍCOLA MEDIANTE MODELACIÓN GEOESPACIAL Y ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA CUENCA BALSAS MEZCALA

Anastacio Espejel-García; Jorge Romero-Domínguez; Ariadna Isabel Barrera-Rodríguez;
Benjamín Torres-Espejel y Jesús Félix-Crescencio

Ra Ximhai, Julio-Diciembre, 2015/Vol. 11, Número 5 Edición Especial

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 77-95





DETERMINACIÓN DEL USO POTENCIAL AGRÍCOLA MEDIANTE MODELACIÓN GEOESPACIAL Y ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA CUENCA BALSAS MEZCALA

DETERMINATION OF AGRICULTURAL POTENTIAL BY GEO SPATIAL MODELING AND MULTI CRITERIA ANALYSIS FOR “BALSAS MEZCALA” WATERSHED

Anastacio **Espejel-García**¹; Jorge **Romero-Domínguez**²; Ariadna Isabel **Barrera-Rodríguez**³; Benjamín **Torres-Espejel**³ y Jesús **Félix-Crescencio**³

¹Catedrático CONACYT- Universidad Autónoma Chapingo. ²Profesor-Investigador Titular de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria. ³Investigador del Instituto para la Gestión de la Innovación y el Desarrollo, INGENIO S.C.

RESUMEN

El uso de sistemas de información geográficas (SIG), facilita modelar información específica permitiendo mayor rapidez, menor costo y precisión para la planeación de las actividades agrícolas de grandes extensiones territoriales. El objetivo de este trabajo fue utilizar los SIG como apoyo para el planteamiento del uso potencial del suelo de la cuenca Balsas Mezcala; se utilizó la técnica de análisis multicriterio, que permite considerar problemas de decisión con múltiples objetivos y criterios del tipo geopedológicos (geomorfología y suelo), climatología (modelos térmicos y pluviométricos) y los requerimientos edafo-climatológicos de los cultivos. La región hidrológica Balsas Mezcala localizada en los estados de Guerrero y Puebla se eligió como zona de estudio; a través de material cartográfico se delimito el área y se obtuvo información climática de las estaciones meteorológicas, la información geográfica y bases de datos se recolectaron de distintas dependencias gubernamentales (INEGI, SEMARNAT, CONABIO, CONAGUA, IMTA), dicha 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. A partir de matrices geoespaciales y datos vectoriales se generaron datos ráster, mismos que fueron sometidos a un proceso de modelación con algoritmos geoestadísticos y a partir de un lenguaje estructurado se identificaron las zonas potenciales con altos niveles de aptitud, a través de los atributos de las variables a las cuales se les asignaron valores de peso utilizando la metodología propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en 1971 y retomado por FAO para estudios de caso desde 1977 como Zonificación Agroecológica (ZAE). El resultado de la modelación con respecto a la aptitud del suelo generó 4 clases con 6 niveles de aptitud (muy apto, apto, moderadamente apto, poco apto, muy poco apto y no apto): tierras con potencial irrigable, tierras para cultivos básicos, tierras para cultivo de hortalizas y tierras para el cultivo de especies de importancia industrial.

Palabras clave: SIG, geo estadística, matrices geoespaciales, raster.

SUMMARY

The use of geographic information systems (GIS) facilitates the modeling of specific information allowing faster, lower costs and accuracy for the planning of the agricultural activities for large territories.

The objective for this paper was to use GIS as a support for the approach of the land use potential for the “Balsas Mezcala” watershed; for this purpose the multi criteria analysis was used, that allows to consider decision make issues with multiples objectives and considering the following criteria: geo-pedological (geomorphology and soil), climatology (thermal models and rainfall) and the edapho-climatological requirements of the crops, the “Balsas Mezcala” hydrological region was chosen as the study area; through cartographic material the area was delimited and climate information was obtained from weather stations, geographic information and the data bases was collected from many different government agencies (INEGI, SEMARNAT, CONABIO, CONAGUA, IMTA), such information was processed in the ArcGIS software version 10.2.2, to obtained the geodatabases and geo spatial matrix which served as a cartographic input for the multi criteria analysis. The result of this investigation is a system that from geo spatial matrix and vectorial data originates raster dataset, same that were submitted to a modeling process with geo statistical algorithms, with that from a structure language, identify the potential zones with the highest aptness level, through the variable attributes that assign a weighted value using the methodology proposed by the United States Department of Agriculture (USDA) in 1971 and taken by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) for case studies since 1977 as an Agro-ecological Zoning System (AEZ).

The result of the modeling of the soil aptness level in the watershed are 4 classes with 6 levels of aptness (very apt, apt, moderately apt, little apt, very little apt, unapt): Lands with irrigation potential, lands for basic crops, lands for vegetables growing, lands for growing species with industrial importance.

Key words: GIS, geo statistical, geo spatial matrix, raster dataset.

INTRODUCCIÓN

El término de agricultura sustentable se conceptualiza como un sistema productivo de alimentos que debe garantizar una manutención en el largo plazo del uso de recursos naturales y de la productividad agrícola (Bezerra y Veiga, 2000). Ehlers (1996) menciona 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 con los recursos naturales disponibles que el ecosistema proporciona. Manzatto (2002) menciona que para obtener buenas cosechas solo debe ser considerado un soporte máximo de producción y un uso adecuado de la tierra, como primer camino en dirección a la productividad.

De acuerdo con la Política Nacional de Desarrollo Sustentable, 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 sufren efectos acumulados de contaminación durante años, provocando la reducción de la productividad del suelo originado a partir del mal uso 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 logre 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 plena y sustentable todos los recursos naturales disponibles como condición básica para la superación de la pobreza, cuidado del ambiente y de los recursos naturales; en este sentido, el análisis del potencial productivo agrícola es una propuesta metodológica para el mejor aprovechamiento de los recursos naturales en las cuencas hidrológicas (Política Ambiental para un crecimiento Sustentable, 2005).

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

Una modelación de la aptitud para el uso de la tierra, debe ser el primer paso para una planeación sustentable del aprovechamiento 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 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 no gubernamentales y gubernamentales, para grupos de agricultores e investigadores, sobre las prácticas adecuadas para la experimentación y modelación (Doorman, 1991), aún más si se toman en cuenta los resultados que se obtiene con la técnica de análisis multicriterio, en el ámbito de investigación cualitativa.

La delimitación de zonas con potencial agrícola para una región implica ventajas en el manejo de los cultivos ya que producir un especie fuera de su ambiente optimo encarece las tecnologías de producción o bien simplemente reduce el rendimiento por las condiciones ambientales, ecológicas y edafológicas (Ruiz y Flores, 1995).

El procedimiento radica en cotejar las disponibilidades agroecológicas de la cuenca, para las distintas clases objeto de la investigación. La selección de áreas se realiza mediante sobre posición de algebra de mapas, realizada a través de sistemas de información geográfica (Eastman, 1993).

Definición de variables

La calidad de la información obtenida en los mapas de aptitud potencial es directamente proporcional con el número de variables con las que se construyó el modelo y a su vez con la calidad con la que está construida dicha variable.

De acuerdo con Díaz *et al.* (2001), el eje primordial para la clasificación de potencial productivo, son los requerimientos agroecológicos, esto implica conocer cuáles son las necesidades de temperatura precipitación, altitud, pendiente, suelos, etc. y encontrar las zonas o regiones donde se cumplen dichos requerimientos en forma muy apto, apto, moderadamente apto, poco apto, muy poco apto y no apto.

En esta investigación 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 hidronio en el suelo (Ph).

Los datos meteorológicos se extrajeron del software Eric III (Extractor Rápido de Información Climática) versión 3.2. En la cuenca Balsas-Mezcala se tienen 51 estaciones meteorológicas, de las cuales solo 20 cumplieron con el mínimo requerido de datos históricos (2003-2013).

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

1). Temperatura media anual (°C). Estos valores que se obtuvieron a partir del promedio de las temperaturas medias registradas en cada uno de los doce meses del año, su distribución es muy irregular ya que está estrechamente ligada a la configuración del relieve de la cuenca, como se muestra en la *Figura 2*.

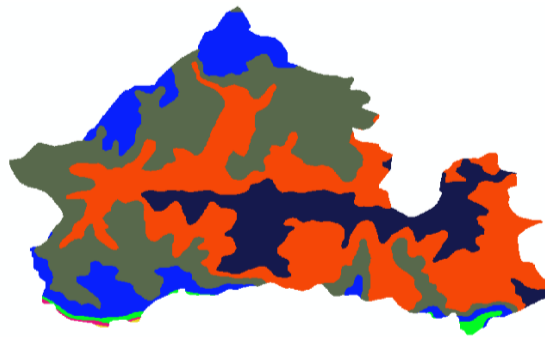


Figura 2.- Temperatura media anual de la cuenca Balsas-Mezcala (elaboración propia a partir del shapefile de “isoyetas” de CONABIO, 2015).

2). Precipitación anual mm (Isoyetas). Son valores que se obtuvieron al calcular la precipitación promedio de la cuenca, analizando las series de datos disponibles, en ese caso 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 3*. 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.

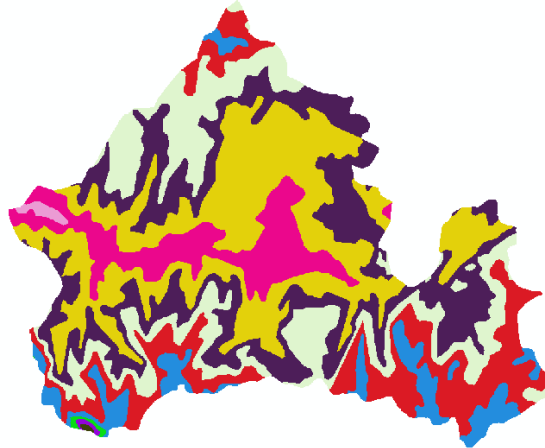


Figura 3.- Precipitación anual de la cuenca Balsas-Mezcala (elaboración propia a partir del shapefile de "isoyetas" de CONABIO, 2015).

3). 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 (centímetros). Los pesos están en función del movimiento radicular.
- Suelo dominante (Fase /Descripción). Los pesos están en base al uso deseado.
- 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.

4). Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:1'000'000 INEGI serie II (Continuo Nacional), 2003.

5). Modelo de Elevación Digital (DEM), tamaño de celda = 30; de Conabio, escala 1:1'000'000 para determinar mediante el software ArcGis dos parámetros: Pendientes (%) *Figura 4* y Altitud (msnm) *Figura 5*, que en conjunto dan la condición actual de ladera como se aprecia en las siguientes figuras:

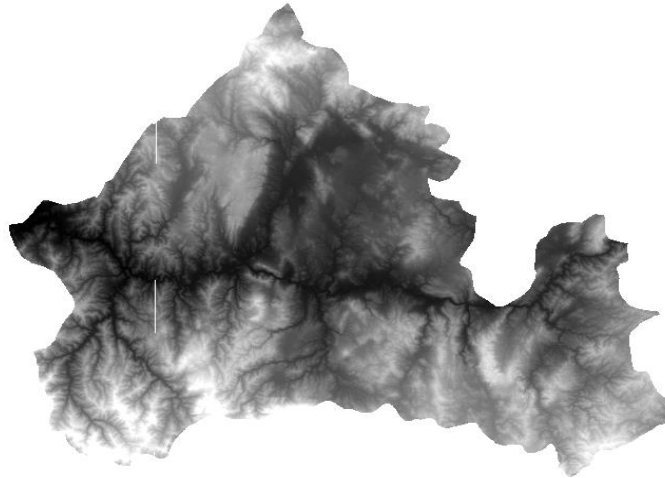


Figura 4.- Mapa de altitud de la cuenca Balsas-Mezcala (elaboración propia a partir del DEM, de CONABIO, 2015).

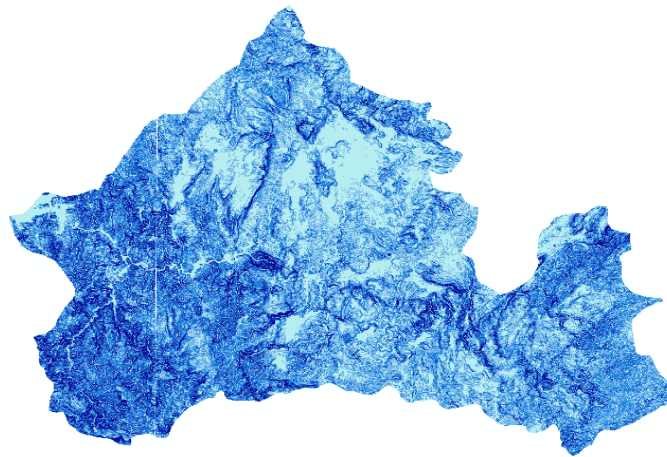


Figura 5.- Mapa de pendientes de la cuenca Balsas-Mezcala (elaboración propia a partir del DEM, de CONABIO, 2015).

6). Perfiles de suelo de INEGI para determinar 5 parámetros a través de análisis geo estadístico: 1) Nitrógeno (N), 2) Fosforo (P), 3) Potasio (K), 4) Materia Orgánica (MO), y 5) 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 6*.

Los requerimientos agroecológicos de los cultivos se determinaron en función de las fichas técnicas de INIFAP (2013) para Hortalizas, Cultivos Básicos, Uso Industrial y Cultivos de riego por gravedad.

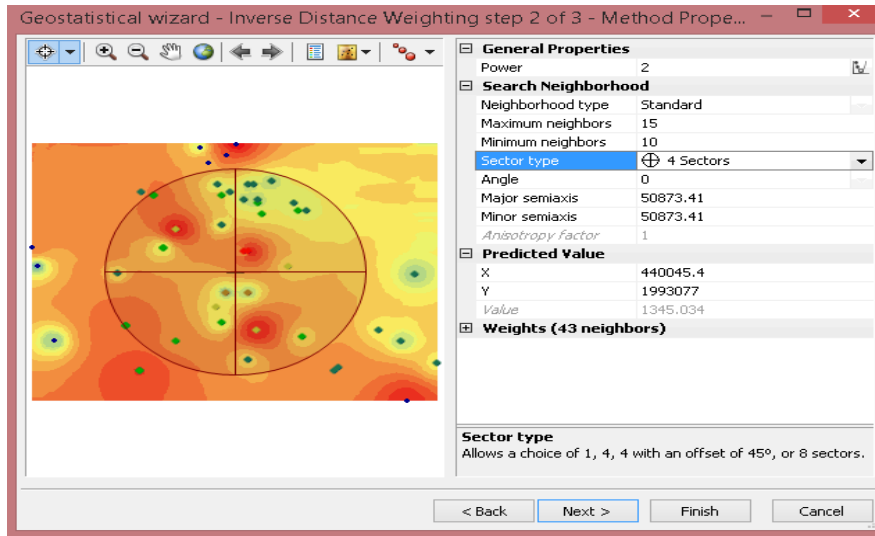


Figura 6.- Interfaz de interpolación de los parámetros en ArcGIS 10.2.2 (elaboración propia, 2015).

Análisis multicriterio y multiobjetivo

El uso del análisis multicriterio es utilizado principalmente para analizar problemas, sistemas o casos con múltiples objetivos y con información cuantitativa y cualitativa (Roche y Vejo, 1998). Tal como la información del espacio geográfico, la cual contiene una serie de elementos relacionados entre sí con diversos grados de complejidad lo cual constantemente resulta en un problema para el manejo y análisis de la información (Hernández, 2009). El análisis multicriterio es idóneo para la modelación de la información espacial ya que es mediante este método que se puede generar una representación del mundo real, donde se pueden localizar elementos sobresalientes, identificación de fenómenos, áreas de interés entre otros. La investigación brindara elementos de decisión territorial y con ello, convertirse en una herramienta de apoyo (Herrera, 2013) en la toma de decisiones para organismos gubernamentales y de planificación territorial.

Con el uso de la técnica multicriterio se generaron matrices de ponderación utilizando el *método del Scoring* (Roche y Vejo, 1998), el cual simplifica la asignación de ponderación, identificando de manera sencilla la alternativa preferible en un problema de decisión multicriterio, utilizando una esa de 5 a 0, generando así seis niveles de aptitud: i)Muy apto, ii)Apto, iii)Moderadamente apto, iv)Poco apto, v)Muy poco apto y vi)No Apto, 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 4 clases de cultivos propuestas, las cuales se muestran del *Cuadro 1 al 4*.

Se utilizó la metodología descrita por la 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 partió de la construcción de las matrices de ponderación, 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.

Cuadro 1.- Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial de riego (elaboración propia, 2015)

Variables Agronómicas/Nutrimentales									
Kg/ha	N	Kg/ha	P	Kg/ha	K	Materia orgánica		Ph	
	Peso		Peso		Peso	%	Peso	Peso	
>400	5	>250	5	>400	5	<0.6	0	6.4-7.3	5
350-400	4	200-250	4	350-400	4	.6-1.2	1	7.3-7.7	4
300-350	3	150-200	3	300-350	3	1.2-1.8	2	6-6.4	3
250-300	2	10-1500	2	250-300	2	1.8-2.4	3	7.7-8.0	2
200-250	1	50-100	1	200-250	1	2.4-3	4	4.0-6.0	1
<200	0	<50	0	<200	0	>4.2	5	8.0-6.0	0

Variables Edafológicas							
Tipo	Suelo	Tipo	Textura	Altitud		Pendiente	
	Peso		Peso	Msnm	Peso	%	Peso
Castañozem	5	Arcillas	4	0-1000	5	0-1.5	5
Luvisol	4	Limos	5	1000-1500	5	1.5-3	4
Nitosol	3	Arenas	2	1500-2000	5	3.0-5.0	3
Rendzina	2			2000-2500	5	5.0-10.0	2
Regosol	1			2500-3000	5	10-15.0	1
Gleysol	0			>3000	0	> 15	0

Variables Climáticas					
Periodo de crecimiento		Temperatura		Precipitación	
Rango	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso
160-190	5	27-30	5	1100-1200	5
160-130	4	24-27	4	900-1100	4
130-100	3	20-24	3	700-900	3
100-70	2	20-16	2	500-700	2
70-40	1	16-10.0	1	300-500	1
<40	0	<10	0	>400	0

Posteriormente se asignaron ponderaciones a las variables, dependiendo de la clase de aptitud a trabajar. Para el caso de las zonas de riego (*Cuadro 1*) se buscó que las características de la tierra consideraran; suelos ricos en nutrientes, con mínima pendiente, textura limosa, con altas precipitaciones anuales y rangos entre 5 y 6 meses de lluvias.

Cuadro 2.- Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial para cultivos básicos (elaboración propia, 2015)

Variables Agronómicas/Nutrimentales									
Kg/ha	N	Kg/ha	P	Kg/ha	K	Materia orgánica		Ph	
	Peso		Peso		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	4	0-1000	5	>100	0
Luvisol	4	Limos	5	1000-1500	5	75-100	1
Andosol	3	Arenas	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

Para la ponderación de las zonas con aptitud potencial para la clase de cultivos básicos (*Cuadro 2*) se agruparon, sistematizaron, los requerimientos del maíz, frijol, cebada, trigo, avena y sorgo, para generar la matriz que detectará las zonas potenciales para los cultivos mencionados.

Cuadro 3.- Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial para cultivos hortícolas (elaboración propia, 2015)

Variables Agronómicas/Nutrimientales									
N		P		K		Materia orgánica		Ph	
Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	Kg/ha	Peso	%	Peso		Peso
>250	5	>100	5	>350	5	<0.6	0	<4.6	1
200-250	4	80-100	4	280-350	4	.6-1.2	1	5.0-6	3
150-200	3	60-80	3	210-280	3	1.2-1.8	2	6--6.8	4
100-150	2	40-60	2	140-210	2	1.8-2.4	3	6.8-7.2	5
50-100	1	20-40	1	70-140	1	2.4-3	4	7.2-7.7	3
<50	0	<20	0	<70	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
Feozem	4	Limos	5	1000-1500	5	75-100	1
Planosol	3	Arenas	3	1500-2000	5	35-75	2
Rendzina	2			2000-2500	4	20-35	3
Regosol	1			2500-3000	3	10.0-20	4
Gleysol	0			>3000	2	<10	5

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

En cuanto a la elaboración de la matriz de ponderación para cultivos hortícolas (*Cuadro 3*) se agruparon sistematizaron los requerimientos del tomate, jitomate, chícharo, pepino, pimiento, calabaza, col, lechuga, apio, brócoli, coliflor, rábano, cilantro, repollo, espinaca, esparrago, alcachofa, cebolla, betabel, zanahoria y papa, a fin de identificar las zonas potenciales para estas hortalizas.

Cuadro 4.- Matriz de ponderaciones para determinación de zonas agrícolas con potencial para cultivos de importancia industrial (elaboración propia, 2015)

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

Otra clase de cultivos que se identificaron fueron aquellos de importancia industrial, que en este caso fueron café, caña de azúcar, algodón, té, tabaco y stevia, determinando mediante la matriz (Cuadro 4), las zonas potencialmente aptas para su producción dentro de la cuenca Balsas Mezcala.

Una vez generados los insumos para la modelación de las 4 clases de cultivos propuestas, se continuo con el procesamiento de los datos en el software especializado ArcGIS 10.2.2 (Figura 7), para la elaboración de mapas que, de acuerdo con Calderón (2015) se realiza con el fin de conocer las áreas con potencial idóneo para el desarrollo de los grupos (clases) estratégicos de cultivos planteados en la presente investigación

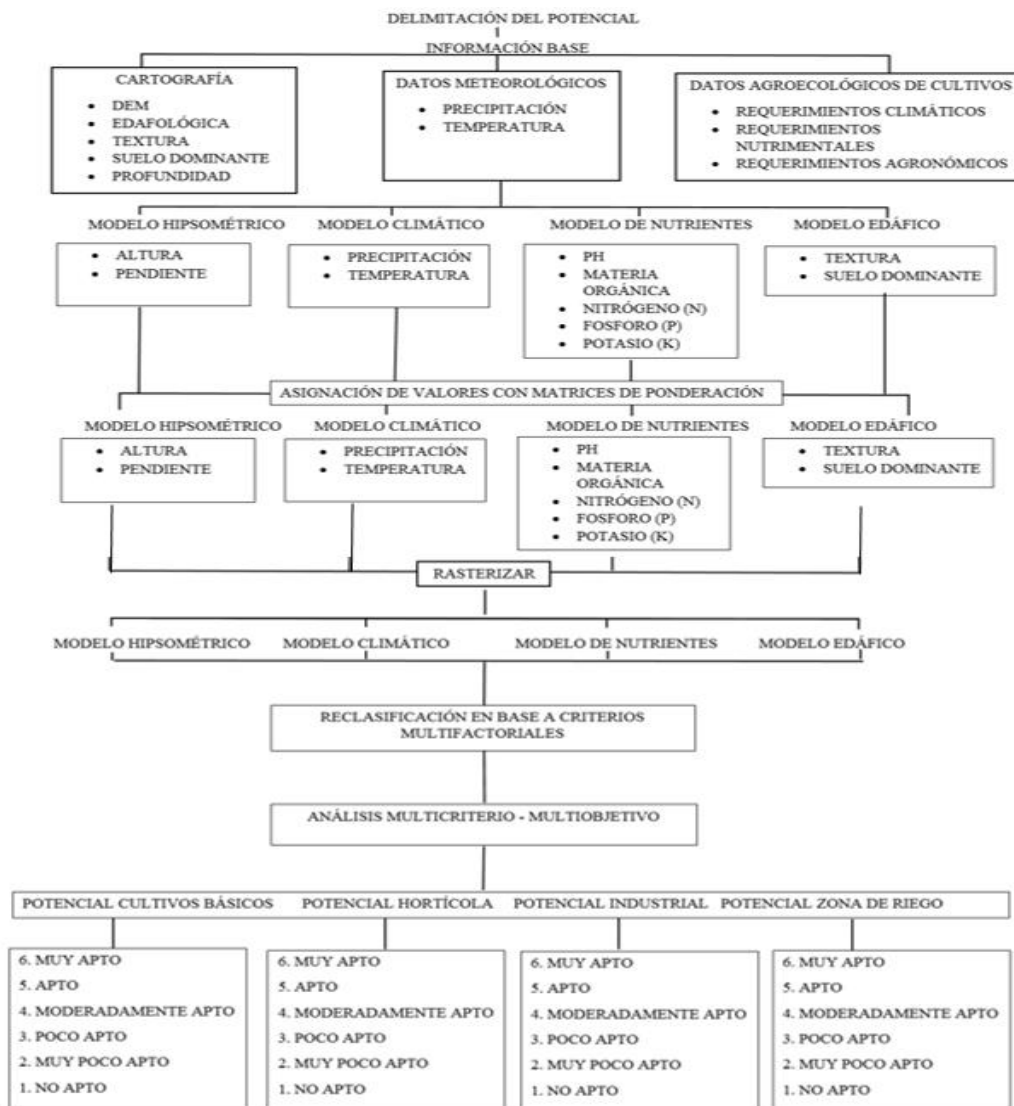


Figura 7.- Esquema de la metodología para determinación del uso potencial agrícola (elaboración propia, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSION

El potencial para cultivos básicos

La modelación multicriterio generada con el programa de sistemas de información geográfica arrojó que la cuenca presenta dos niveles de aptitud (apto y moderadamente apto) lo cual significa que existen condiciones idóneas para obtener un porcentaje de producción correspondiente al 80% y 60 % respectivamente, *el potencial apto* se encuentra en zonas de pie de montaña , laderas y planicies que presentan pendientes no mayor a 10 % , donde los suelos dominantes son ricos en nutrientes como el Ca, Mg, K y Na y ricos 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 encuentran ubicada desde la parte central hacia el norte de la cuenca de estudio, el total de superficie con esta aptitud es del 44%.

El potencial considerado como *moderadamente apto* se encuentra en zonas de montañas y lomeríos 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 oxidación de nutrientes, el color del suelo es claro y rojizo , donde la arcilla se ha depositado en los estratos del subsuelo, la distribución de esta clase de potencial se extendían a lo largo de la cuenca en dirección de este a oeste, principalmente hacia la parte sur de Río Mezcala, la superficie total corresponde a un extensión del 56 % (Figura 8).

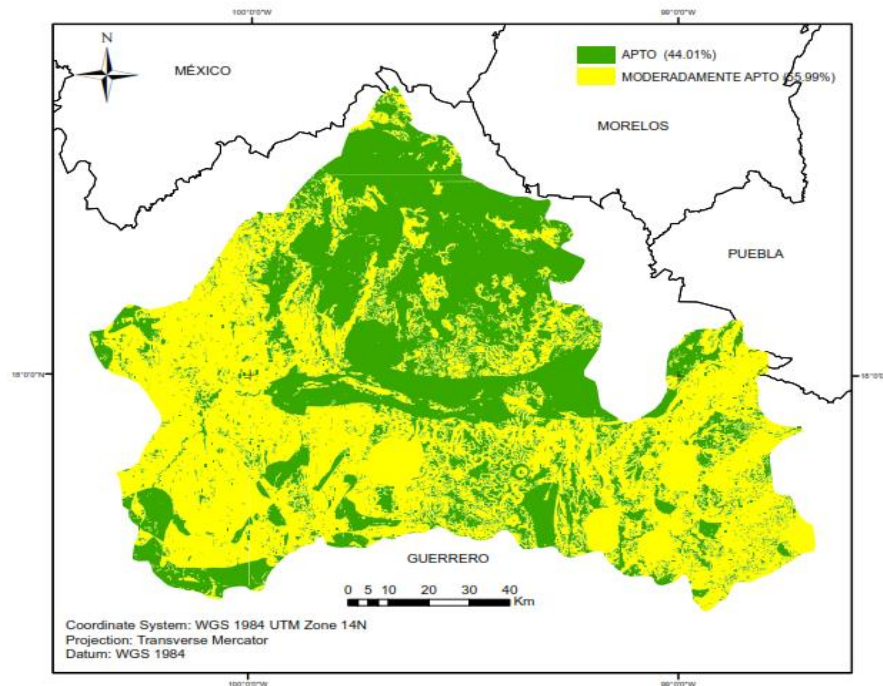


Figura 8.- Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de cultivos básicos (elaboración propia, 2015).

Potencial de zonas de irrigación

Los mejores rendimientos se obtienen en lugares donde es posible suministrar riego adecuadamente en las etapas fenológicas de la planta, es por esta razón que identificar las zonas potenciales para desarrollar la agricultura de riego en una cuenca tiene un carácter estratégico, considerando que esto es fundamental en cualquier modelo de planeación agrícola; en función de los algoritmos del análisis multicriterio usado se obtuvo que en la cuenca Balsas-Mezcala existen tres niveles de potencial (apto, moderadamente apto y muy poco apto) esto indica que en el 88.8% la superficie de la cuenca puede practicarse la agricultura de riego; de los resultados del modelo se tiene que el *potencial apto* para agricultura de riego se extiende en las porciones suroeste, noroeste y noreste de la cuenca siendo la parte noroeste y noreste las de mayor dominancia por ocupar un 65%; en el otro 35% se ubica la porción suroeste de la cuenca. Este potencial se distingue por presentar pendientes de los terrenos menores a 1.5 %, prácticamente son terrenos planos con una profundidad promedio de 120 cm , donde la utilización de maquinaria y el desarrollo de infraestructura de riego por gravedad pueden ser desarrollados, además poseen suelos altamente fértiles con posibilidad de introducir especies de cultivos altamente demandantes de nutrientes, la disposición de humedad es de 90-120 días, el periodo de crecimiento para las plantas es de 120 días, la presencia de riesgos meteorológicos (heladas y granizadas) es nulo ya que las temperaturas bajas a 10° C son muy poco probables de presentarse en el año, la precipitación promedio de esta área esta entre los 1100 mm y 1200mm y la temperatura media es de 30°C, la superficie total que corresponde a este potencial es de 29.24 %.

El potencial *moderadamente apto* se ubica en la porción sureste de la cuenca donde se encuentra la mayor superficie de esta categoría, aproximadamente un 60%, el 40% restante se ubica en la región norte y suroeste de la cuenca, este potencial moderadamente apto se caracteriza por presentar pendientes del orden del 1.5 a 3%, incluyendo la topografía de planicie, con la restricción de ser suelos con profundidad promedio de 80 cm y un alto contenido de arcillas en el horizonte B, el uso de maquinaria agrícola es posible en cierta medida por las características del suelo y el riego por inundación puede ser empleado sin ningún problema, el nivel de fertilidad de estos son de moderados a altos pudiendo obtener cosechas con rendimientos adecuados, la disposición de humedad del suelo es de 70- 90 días, el periodo de crecimiento de las plantas es de 160 días, los riesgos de temperaturas abajo de 10 °C son nulos, lo cual se considera como un lugar libre de riesgos meteorológicos, la precipitación promedio es de 900 mm a 1100 mm con temperatura media dominante de 27°C, la superficie total que corresponde a este potencial es de 59.52%.

El *potencial muy poco apto* se ubica en la porción sureste de la cuenca y el área del cauce del río – Mezcala, las limitaciones de impulsar la agricultura de riego en este lugar se debe básicamente al hecho de que los terrenos son de laderas y montañas, donde el valor mínimo de la pendiente es de 15 % , lo cual no permite la adopción de maquinaria y la distribución de agua por gravedad, los suelos de esta zonas son de delgados y no mayores a 10 cm de profundidad y con un alto porcentaje de pedregosidad, presentan fertilidad baja, la disposición de humedad del suelo es menor a 90 días, el periodo de crecimiento de las plantas es de 190 días , esto como consecuencia de las bajas temperaturas prevalecientes respecto a otros sitios de la cuenca, la cual oscila entre los 10°C a 16°C con alta probabilidad de presentarse heladas o granizadas, por lo menos una vez al año; otro factor limitante es la precipitación que para esta área la lluvia corresponde anualmente a una cantidad máxima de 500 mm, la superficie total que corresponde a este potencial es de 11.24% (Figura 9).

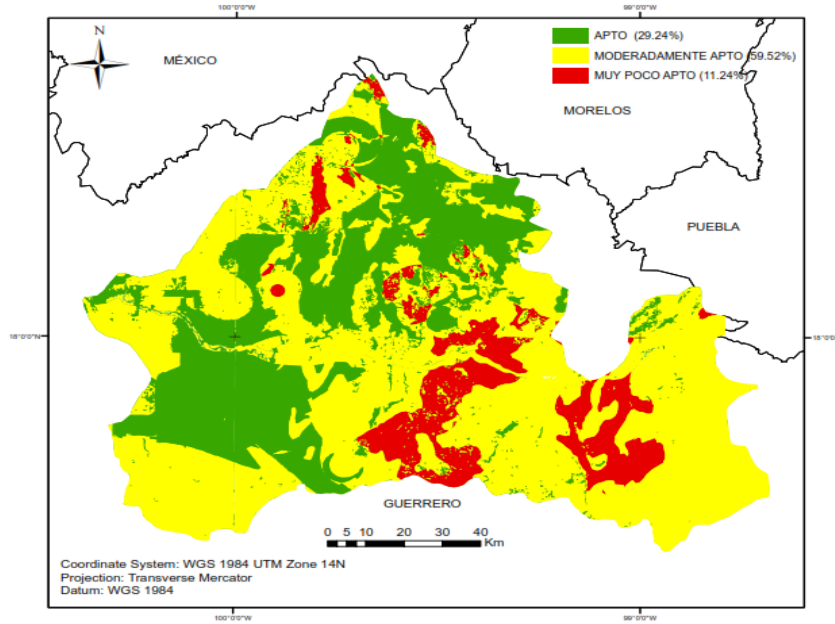


Figura 9.- Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de sistemas de riego (elaboración propia, 2015).

Potencial para cultivo de Hortalizas

El subsector hortícola de México es el más dinámico en términos de crecimiento en su producción y en la generación de divisas. La producción de hortalizas es de las actividades agrícolas más rentables. La superficie agrícola en México corresponde a 21,710 millones de hectáreas, de las cuales las hortalizas ocupan una superficie del 3.8% nacional y aportan el 21% del valor total de la producción de 2000 a 2008, (SAGARPA-SIAP, 2010). Las Hortalizas son el segundo cultivo más importante en la dieta humana después de los granos básicos, ya que estas aportan gran cantidad de vitaminas a la dieta, además su cultivo fomenta la adopción de tecnología agrícola donde se desarrolla, por tanto el cultivo de hortalizas no solo es una estrategia contra el hambre en el país, sino es una opción tangible para generar riqueza en los sitios de las cuencas donde sea posible desarrollarse dicha actividad agrícola al estar aprovechando al máximo las bondades del entorno ecológico para su cultivo, en la cuenca del Balsas-Mezcala de acuerdo al modelamiento SIG-Multicriterio se obtiene que existen dos tipos de potencialidades apto y moderadamente apto, lo cual indica que en estas zonas es posible obtener una producción asegurada del 80 % y del 60 % de rendimiento potencial genético de las especies de hortalizas que se deseen cultivar gracias a las condiciones ambientales óptimas prevalecientes en la cuenca, la *potencialidad apta* se encuentra en las porciones noroeste, noreste y sureste coincidiendo con los sitios aptos para riego de la cuenca donde la pendiente no es mayor al 10 % y los suelos dominantes son los de color oscuro con alto contenido de material orgánico y reservorio de nutrientes altos y profundidades de hasta 120 cm, las condiciones de lluvia son favorecedoras pues la precipitación promedio durante el año es del rango de los 1500 mm a 2000 mm, la textura del suelo es limosa, con gran cantidad de retención de agua que va de los 120 días a los 150 días, en estas zonas las plantas pueden tener un periodo óptimo de crecimiento del orden de los 120 días, con temperaturas de 30°C, la superficie total de este potencial es de 56.65 %. El *potencial moderadamente apto* se ubica en la parte sureste de la cuenca donde existen restricciones por la pendiente ya que estas se encuentran en un rango del 10 % al 20 % y los suelos son delgados y limitados en contenido de nutrientes, en

algunos sitios pueden contener gran cantidad de arcilla en el subsuelo además de presentar problemas de alcalinidad por su alto contenido de Na, el periodo de crecimiento para las plantas es del rango de los 90 a 120 días, la precipitación es de los 1000 mm – 1500 mm y la temperatura mínima corresponde a los 20°C y la máxima a los 27°C, el reservorio de nutrientes el moderado y se debe asistir la nutrición de las hortalizas hasta en un 40 % para obtener y sostener la producción en un nivel adecuado. La superficie total de esta potencialidad es de 43.35 % (Figura 10).

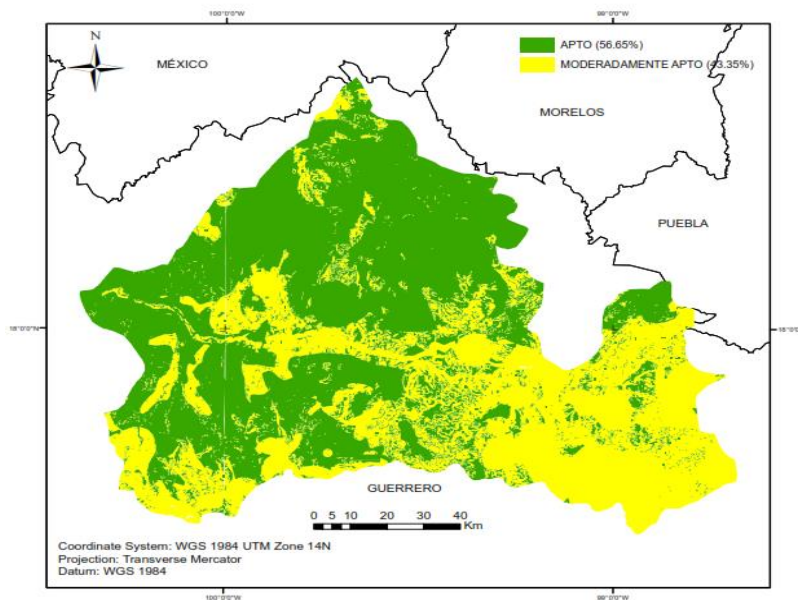


Figura 10.- Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de cultivos de hortalizas (elaboración propia, 2015).

El potencial para cultivos industriales

De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, un cultivo industrial es aquel cuyo producto final no admite consumo directo o para el que su transformación resulta mucho más provechosa. La estrategia agrícola debe considerar también explorar las zonas potenciales para el establecimiento de cultivos industriales con el objetivo de fomentar el desarrollo agroindustrial de las cuencas hidrológicas y aprovechar el agroecosistemas para mejorar su capacidad productiva y beneficiar a la sociedad en su conjunto, con la metodología de análisis multicriterio validada en la cuenca del Balsas-Mezcala se obtuvieron tres tipos de potenciales (apto, moderadamente apto, muy poco apto), *el potencial apto* se ubica en las porciones centro-norte de la cuenca se caracteriza principalmente por contar con suelos con texturas intermedias y estructura tipo porosas, 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 las 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 este potencial es de 12.20 %. *El potencial moderadamente apto* se ubica en las zonas noroeste, sureste, suroeste de la cuenca, 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 es menor a 120 días, la fertilidad del suelo es moderada, el nitrógeno en estos sitios es de 325 kg/ha, el fósforo es 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%-3 %, el pH se encuentra en el rango de los de los 6-6.8, ligeramente ácido. La superficie total de este potencial es de 85.64 %. *El potencial muy poco apto*, se encuentra en algunas partes de la región comprendida en la parte sureste y suroeste, en pendientes muy escarpadas con valores de 75-100%, lo cual impide cualquier uso de tecnología de labranza mecanizada del suelo, y alturas por arriba de los 3000 msnm, los suelos son delgados y poco profundos, nivel de fertilidad bajo, cantidad de nitrógeno en el suelo de 65 kg/ha, el fósforo es de apenas 40 kg/ha y el potasio se encuentra en estos suelos en una cantidad de 120 kg/ha, los sitios tienen 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 de esta aptitud es de 2.16% (Figura 11).

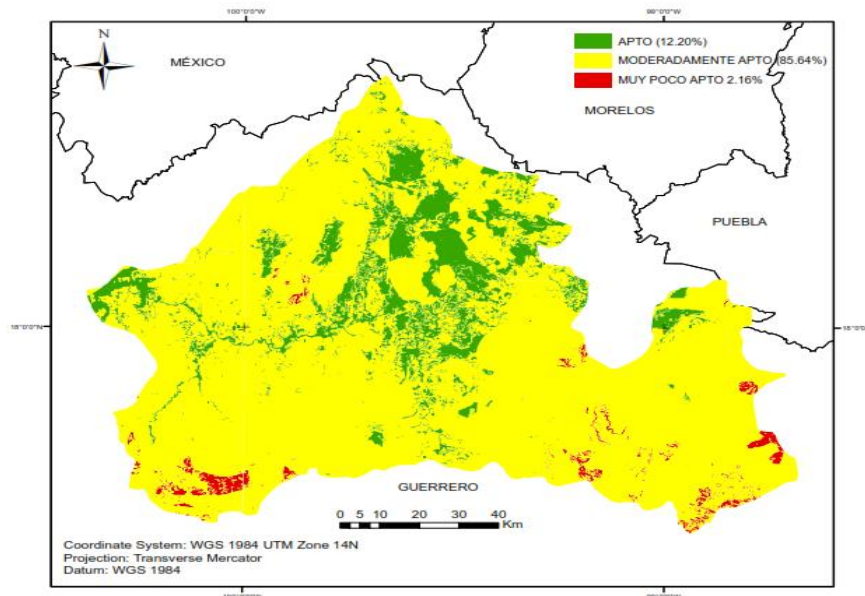


Figura 11.- Mapa de zonas con potencial de aptitud para establecimiento de cultivos de importancia industrial (elaboración propia, 2015).

CONCLUSION

Los resultados del uso potencial agrícola mediante el método de análisis multicriterio demuestra la aplicabilidad y objetividad de los resultados, pues al combinarse con las tecnologías de sistemas de información geográfica posibilita una separación exacta de las potencialidades del suelo al emplear 13 variables del tipo cualitativas y cuantitativas jerarquizadas por criterios climáticos, edafológicos y requerimientos, en matrices de ponderación y asigna valores de peso ponderados con mayor precisión que el método subjetivo del CETENAL y la metodología de Zonificación agroecológica de FAO.

El sistema de información geográfica automatizado realiza en menor tiempo la determinación de las potencialidades, pues con el uso del modelo como Model-builder se crean diagramas lógicos para la introducción de coberturas insumos que generan mapas intermedios que servirán de base para la obtención de la potencialidad final, resultado de la transformación matricial de las bases de datos de los archivos raster empleados en la modelización espacial.

Este trabajo propone el uso de la tecnología de análisis espacial como un método transversal para explorar las opciones de potencialidades en las comunidades de las cuencas hidrológicas en el componente agrícola, ya que al identificar las zonas ambientales más idóneas para la producción de granos básicos que garanticen la alimentación de la población más vulnerable y promuevan la producción de granos básicos en la cuenca.

El modelo sugerido propone la identificación de zonas de riegos para impulsar el cultivo de hortalizas como estrategia de apoyo a los pequeños productores de la cuenca.

Se identifican los sitios más adecuados en donde la agroindustria puede impulsarse como estrategia regional, esto conllevaría a la adopción de mejores tecnologías para el campo e impacto en la calidad de vida de las comunidades y desarrollo de las cadenas agroalimentarias.

LITERATURA CITADA

- Becerra, L. y Veiga, E. (2000). *Agricultura Sustentável*. Ministério do Meio Ambiente. Brasília.
- Bolstad, P. (2005). *GIS fundamentals*. Eider Press. USA.
- 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
- CONABIO. (2015). *Portal de geoinformación*. México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Accesado el día 29 de septiembre de 2015]
- Díaz, G. (2001). *Estudio de las Potencialidades Productivas para el Uso del Suelo del Estado de Veracruz*. INIFAP – Fundación PRODUCE. Xalapa.
- 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> [Accesado el día 1 de Octubre de 2015]
- Doorman, H. (1991). *La Metodología del Diagnostico en el Enfoque “Investigación Adaptativa”: Guía para la Ejecución de un Diagnostico con Énfasis en el Análisis de Finca del Pequeño Productor Agropecuario*. Universidad Nacional, Universidad Estatal e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José.
- Eastman, J. (1993). *GIS and decision making*. UNITAR. Ginebra.

- Ehlers, M. (1996). *Agricultura Sustentável: Orígenes e perspectivas de um novo paradigma*. Livros da Terra. São Paulo, Brasil.
- FAO. (1977). *Zonificación Agro-Ecológica, guía general*. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos; Dirección de Fomento de Tierras y Aguas. Roma.
- Herrera, J. (2013). "Sistema de Información Geográfica (SIG) y Metodologías de Evaluación Multicriterio (EMC) como búsqueda de escenarios alternativos para el mejoramiento socioespacial de las áreas urbanas populares de la ciudad de Comayagua" en *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*. Año 5, Núm. 5, Sección i, 2013, pp. 180-193.
- Hernández, L. (2009). "El premapa para el análisis geográfico" en *Quivera*. Vol. 11, Núm. 2, Junio-Diciembre, 2009, pp. 142-155.
- INEGI. (2003). *Recursos Naturales: Uso de suelo y vegetación*. México. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/> [Accesado en día 28 de septiembre de 2015].
- INIFAP. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Segunda Edición. México. INIFAP. CIRPAC.
- Manzatto, V. *et al.* (2002). *Potencial de uso atual das terras*. Embrapa solos. Rio de Janeiro Brasil.
- Ruiz, C. y Flores, H. (1995). *Áreas con potencial para la producción de frijol en Nayarit*. INIFAP. México.
- Roche, H. y Vejo, C. (1998). "Análisis multicriterio en la toma de decisiones" en Anderson, et al (ed). *Métodos Cuantitativos para los Negocios*. Mc Graw Hill.
- Santiago, J. (2005). "Determinación del uso potencial de la tierra con fines agrícolas en el municipio Bolívar, estado Táchira" en *GEOENSEÑANZA*. Volumen 10, Geoenseñanza. Enero – Junio 2005, pp. 69 – 85.
- SAGARPA, (2010). *Sistema de Información Agrícola y Pecuaria*. Compendio estadístico.
- Young, A. y Dent, D. (1995). *Soil survey and land evaluation*. E. FN SPON. London.
- Zúñiga, O. (2009). "Índice de potencial productivo del suelo aplicado a tres fincas ganaderas de ladera en el Valle del Cauca, Colombia" en *Revista UN* Vol. 58, Núm. 2. Junio 2009. Colombia, Universidad Nacional. Disponible en: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/10422/10897v [Accesado el 25 de Septiembre de 2015]

SINTESIS CURRICULAR

Anastacio Espejel García

Catedrático CONACYT- Universidad Autónoma Chapingo. Doctor en Problemas Económicos Agroindustriales. Especialista en Política de Ciencia, Tecnología e Innovación. Líneas de investigación en sistemas regionales y nacionales de innovación en el sector agroalimentario, redes de innovación y redes de valor aplicadas al sector agropecuario. Correo: anastacio.espejel@gmail.com.

Jorge Romero Rodríguez

Maestro en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por la Universidad Autónoma Chapingo. Profesor-Investigador Titular de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria. Sus líneas de investigación son: Manejo de Recursos Naturales, Percepción Remota y SIG, Agricultura Sustentable para el Ecodesarrollo. Correo: jromiguez@gmail.com.

Ariadna Isabel Barrera Rodríguez

Doctora en Problemas Económicos Agroindustriales por la Universidad Autónoma Chapingo. Actualmente es investigadora del Instituto para la Gestión de la Innovación y el Desarrollo, INGENIO S.C. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores nivel Candidato. Sus líneas de investigación son el desarrollo e innovación organizacional para el sector rural y aplicación de la red de valor a cadenas agroalimentarias. Correo: ariadna.barrera@gmail.com.

Benjamín Torres Espejel

Ingeniero Agrónomo Especialista en Economía Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Es investigador por el Instituto para la Gestión de la Innovación y el Desarrollo, INGENIO S.C. Su línea de trabajo es el análisis financiero y económico de empresas rurales.

Jesús Feliz Crescencio

Ingeniero Agrónomo Especialista en Economía Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Es investigador por el Instituto para la Gestión de la Innovación y el Desarrollo, INGENIO S.C. Su línea de trabajo es el análisis financiero y económico de empresas rurales.