Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
ISSN 0188-4611, núm. 86, 2015, pp. 25-37, dx.doi.org/10.14350/rig.39936

Zonificación edafoclimática para el cultivo de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México

Recibido: 12 de junio de 2013. Aceptado en versión final: 13 de febrero de 2014.

Rigoberto González Mancillas*
José Francisco Juárez López**
Lorenzo Armando Aceves Navarro**
Benigno Rivera Hernández***
Armando Guerrero Peña**

Resumen. El agotamiento de las reservas petrolíferas y la creciente demanda energética mundial, ponen en evidencia la necesidad de ampliar la oferta de aceites para la producción de biodiesel. El objetivo principal de este estudio, fue determinar las zonas aptas con diferentes aptitudes agroecológicas, para establecer el cultivo de *Jatropha curcas* en el estado de Tabasco. Para ello se definieron cuatro tipos de aptitud: óptima, adecuada, marginal por déficit térmico e hídrico, y marginal por exceso térmico e hídrico. Para el recurso suelo se consideró la fertilidad, profundidad, textura y pH, y se utilizó la clase de aptitud óptima. La delimitación de estas zonas se generó mediante la implementación de un sistema de información geográfica (SIG), el cual facilitó la manipulación y sobreposición de capas de información temática de clima y suelo. El análisis promedio anual de temperatura demostró que todo el estado de Tabasco presenta aptitud óptima y con el de precipitación se obtuvo una superficie de 2 229 631 ha con aptitud óptima. En lo referente al recurso suelo se detectaron 37 subunidades de suelo con aptitud óptima, sumando una superficie de 945 462 ha. Al realizar el álgebra de mapas entre las aptitudes óptimas climáticas (temperatura, precipitación y periodo de crecimiento) y edafológicas, se obtuvieron 833 181 ha con aptitud agroecológica óptima, por lo que en el estado de Tabasco es factible cultivar esta oleaginosa para producir biocombustibles.

Palabras clave: Biocombustible, *Jatropha curcas* L., bioenergía, zonificación edofoclimática.

Edaphoclimatic zones for cultivating *Jatropha curcas* L. in Tabasco, Mexico

Abstract. The exponential growth of energy demand worldwide, the depletion of oil reserves and the severe pollutants problems caused by industry that favors greenhouse effect, evidence the need to increase the supply of oils for biodiesel production. This sets a new overview for studying non-edible oilseeds species. An alternative is barbados nut or piñon (*Jatropha curcas*) crop, perennial bush that is native from Mexico and Central America, grows in most of tropical countries, and it is considered like one of the non-conventional oilseed crops with great expectations for obtaining biodiesel.

The barbados nut (*Jatropha curcas*) seeds have an outstanding characteristic: their high oil content allows converting it to liquid biofuel, and also the shell can be

* Colegio de Postgraduados, Programa de Hidrociencias, Campus Texcoco, Carretera México-Texcoco, km. 38.5, 56230 Montecillo, Estado de México. E-mail: rgonzalez@colpos.mx
** Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina, km. 3 Carretera Cárdenas Huimanguillo, Tabasco.
*** Universidad Popular de la Chontalpa, Carretera Cárdenas Huimanguillo, km. 2, R/a, Pazo y Playa, Cárdenas, Tabasco.

transformed into biogas and biofertilizers. *Jatropha curcas* is a green option to reforest degraded soils and to control erosion, as well as an option to diversify agricultural systems (crop rotation). On the other hand, in several scientific studies it is reported a wide variation in yields, due lack of study of plant's genetics, the agronomic handling, as well to the misunderstanding that exists in some countries in the field of zones with best agroecological ability to set the crop. The agroecological zoning (ZAE) refers to a division of land surface and weather into smaller units, that have similar characteristics related to its ability, potential yield and environmental impact.

The aim of this paper is to define the zones with different agroecological abilities to set the *Jatropha curcas* crop, in the state of Tabasco. In order to accomplish this, four types of abilities were defined: optimal, proper, marginal by thermal or water deficit, and marginal by thermal or water excess. The agroecological zoning (ZAE) proposed in this paper defines zones based on combinations of soil, physiography, weather characteristics of temperature, rainfall and growth rate.

An agroclimatic zoning is a zone with characteristics related to weather and crop systems, for our study the database of ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica) was used, reporting for Tabasco a total of 93 meteorological stations. Nevertheless, only 35 stations were selected, since the other had inconsistencies in their information. From those 35 stations, a weather database was created, considering the information of historical series in a daily basis, like minimum and maximum temperatures, rainfall and evaporation (1950 – 2003 period).

The edaphoclimatic zoning consisted in assessing the soil resource based in the units and subdivisions of soil from FAO/UNESCO system. In order to fulfill the zoning, cartographic data of soils subunits was consolidated, including texture, slope, soil depth, and its fertility, whose edaphological properties were compared to FAO's *Jatropha curcas* crop requirements and optimal level was assigned.

The tool used for cartography elaboration was ArcMap GIS Software, which consists of computer mapping system that relates locations with agroclimatic information equal to *Jatropha curcas* crop requirements, which were defined like areas with ability, and according to this maps were prepared at a scale of 1:250 000 of every climatic element. The interpolation for the calculation of isolines was made by Kriging method, embedded within ArcMap software, which ease the handling and superposition of theme information layers of weather and soil.

The yearly average analysis of temperature corroborated that whole Tabasco state has optimal ability and the rainfall analysis showed a surface of 2 229 631 ha with optimal ability. About soil resource there were detected 37 subunits of soil with optimal ability, adding a surface of 945 462 ha. After analyzing the maps between optimal characteristic abilities (temperature, rainfall and growth rate) and edaphological, there were detected 833 181 ha with optmial agroecological ability, therefore in the state of Tabasco is feasible the crop of this oilseed to produce biofuels.

Key words: Biodiesel, *Jatropha curcas* L., Bioenergy, and edaphoclimatic zoning

INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial que crece exponencialmente, el agotamiento de las reservas petrolíferas y los graves problemas de contaminantes derivados de la industria que potencian el efecto invernadero, ponen en evidencia la necesidad del cambio de paradigma, con un vuelco hacia las energías limpias y renovables. Así, es necesario ampliar la oferta de aceites para producción de biodiesel, lo que abre un nuevo escenario para el estudio de especies oleaginosas, no aptas para el consumo humano (Falasca y Ulberich, 2008a).

Una de las alternativas es el cultivo de piñón (*Jatropha curcas*), arbusto perenne originario de México y América Central (Heller, 1996), que crece en la mayoría de los países tropicales, considerado como uno de los cultivos oleaginosos no tradicionales con mayor perspectivas para la obtención de biodiesel (Behera *et al.,* 2010), su alto contenido de aceite en las semillas puede convertirse a biocombustible líquido (Tiwari *et al*., 2007), además la cáscara se puede transformar en biogás y biofertilizantes (Falasca y Ulberich, 2008b).

Ecológicamente el cultivo de *Jatropha curcas* es una alternativa para reforestar suelos degradados y para controlar la erosión, así como una opción para diversificar los sistemas agrícolas (cultivos intercalados), (Behera *et al.,* 2010). Por otra parte, en los diversos reportes científicos se observa una variación amplia en los rendimientos reportados, la cual, según Achten *et al*. (2008), se debe a la falta de comprensión de la genética de la planta, el manejo agronómico, así como la incomprensión que tienen algunos países respecto a las áreas con mayor aptitud agroecológica para establecer el cultivo (André *et al*, 2010).

La zonificación agroecológica (ZAE) se refiere a la división de la superficie de la tierra y el clima, en unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su aptitud, con la pro-

ducción potencial y con el impacto ambiental (FAO 1997), y una zonificación agroclimática es una zona con características relacionadas entre el clima y los sistemas de cultivo (White *et al.,* 2001). Los estudios de zonificación agroecológica de cultivos, son muy importantes en la delimitación de áreas, ya que con ello es posible definir qué cultivos tienen mayor potencial de producción. Las investigaciones más avanzadas al respecto han incorporado bases de datos enlazadas a sistemas de información geográfica (SIG), relacionadas con modelos estadísticos, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de la tierra (Jiménez *et al.,* 2004).

Estudios realizados por Rodríguez *et al.* (2009) menciona que, a nivel mundial, se cuenta con 175 especies de *Jatropha* L. y 45 de ellas se encuentran en México, y se distribuyen de manera endémica principalmente en los estados de Yucatán, Tabasco, Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Guerrero, Puebla, Morelos, Nayarit, Jalisco, Michoacán y Sinaloa. En México se reportan plantaciones de *Jatropha curcas* en el estado de Yucatán con 2 450 ha, Quintana Roo con 400 ha (SIAP-SAGARPA, 2012) y 5 000 ha en el estado de Chiapas (Solís, 2011).

En México existen dos estudios realizados de zonificación para *Jatropha curcas,* en el primero reportan una superficie de 3.2 millones de hectáreas con potencial medio y 0.57 millones de hectáreas con alto potencial, para ello se utilizó una escala cartográfica de 1:200 500 000 (Ghilardí *et al.,* 2008). El segundo trabajo fue realizado por Zamarripa y Díaz (2008) a una escala de 1:250 000 reportando una superficie de seis millones de hectáreas con alto y medio potencial. Sin embargo, en ambos estudios, realizados a nivel nacional, Tabasco no figura como apto debido a la escala utilizada. Es por ello que el objetivo de este trabajo fue determinar las zonas con mayor aptitud edafoclimática para establecer el cultivo de *Jatropha curcas*, en el estado de Tabasco. Ello permitirá definir zonas homogéneas con rendimiento potencial para el cultivo, obtener los máximos rendimientos y maximizar la producción de biodiesel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

El estado de Tabasco se ubica geográficamente en la región sureste de la República Mexicana, entre las latitudes 18°38' y 17°15' N y las longitudes 90°38' y 94°07' W, consta de una superficie de 24.751 km^2. Presenta una precipitación media anual mayor de 2 000 mm (CONAGUA, 2011) y tres tipos de clima: cálido húmedo con lluvias todo el año (Af), cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am) y cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), (García, 2004; Figura 1).

Para delimitar las zonas de alta potencialidad para el cultivo de *Jatropha curcas* se utilizó el procedimiento de zonificación agroecológica propuesto por la FAO (1997), y el de *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA), (Fischer *et al.,* 2012).

De acuerdo con la FAO (1997) y Fischer *et al.* (2012), la producción es determinada por los factores ambientales (suelo y clima) y por un complejo de factores socioeconómicos, culturales y tecnológicos. La zonificación agroecológica (ZAE) propuesta en este trabajo, define zonas con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Las variables usadas en la definición se centran en los requerimientos climáticos, edáficos y de manejo del cultivo.

Selección y requerimientos bioclimáticos del cultivo de la *Jatropha curcas L.*

Existen varias recomendaciones, al respecto, de los requerimientos agroecológicos para la *Jatropha curcas* a nivel mundial, el CATIE (2008) reporta una temperatura óptima de 28-20° C y una precipitación de 600-1 200 mm anuales, mientras que Maes *et al.* (2009) indican que el 95% de las accesiones endémicas de todo el mundo se localizan a una temperatura media anual 19.3 - 17.2° C y de 20-28° C según Achtem *et al.* (2008).

En nuestra investigación, las variables que se consideraron para determinar zonas con alto potencial productivo fueron clima y suelo, por la relación directa que guardan con el rendimiento del cultivo de *Jatropha curcas.* Para conocer la aptitud climática se utilizó la metodología propuesta por Gonçalves

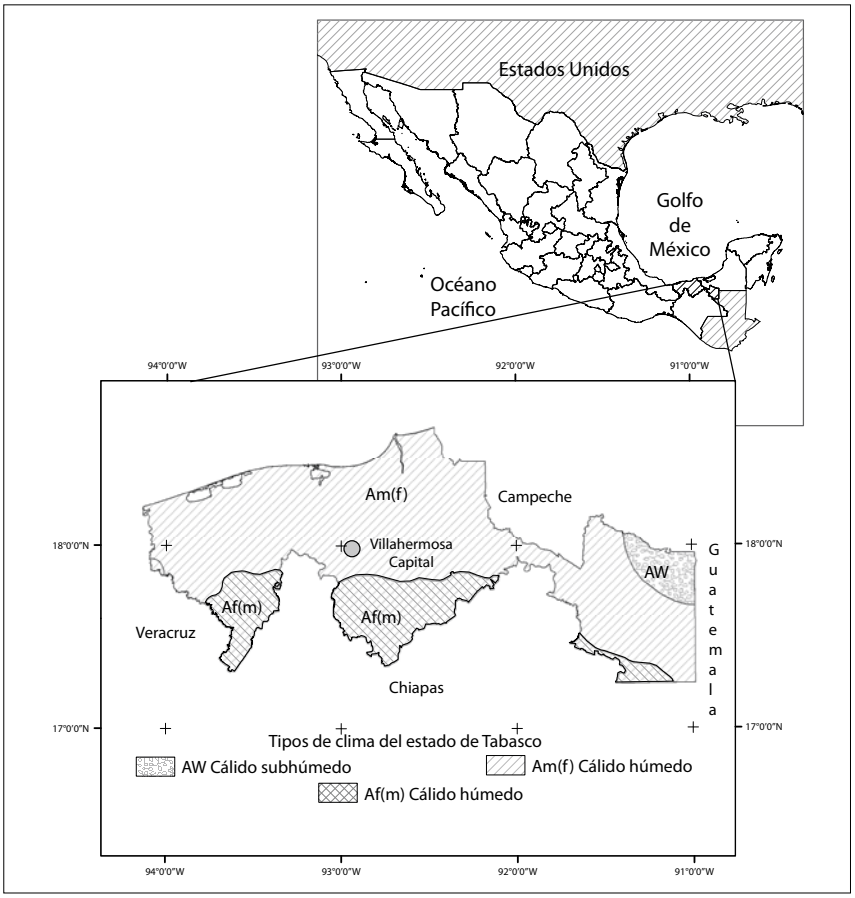

Figura 1. Tipos de climas y ubicación geográfica del estado de Tabasco en la República Mexicana.

y Sentelhas (2008) y Toledo *et al.* (2009) que se presenta en la Tabla 1. Para definir la aptitud óptima por precipitación se realizó una ampliación del rango, de acuerdo con trabajo realizado por Maes *et al.* (2009). Para considerar los requerimientos edáficos que el cultivo de *Jatropha curcas* demanda, se tomaron las variables de profundidad del suelo, pendiente, drenaje, textura, pH, salinidad, toxicidad de aluminio y fertilidad, de FAO (1994), se debe mencionar que solo se consideró la aptitud óptima para el recurso suelo.

Tabla 1. Aptitud agroclimática para definir zonas con potencial productivo para el cultivo de *Jatropha curcas* L. en el estado de Tabasco, México

Aptitud	Temperatura (media anual)	Precipitación (media anual)
Marginal	< 18° C	< 600 mm
Adecuada	≥ 28.5° C a ≤ 35° C	≥ 600 ≤ 1 200 mm
Óptima	≥ 18 a ≤ 28.5° C	> 1 200 ≤2 500 mm
Marginal	> 35° C	> 2 500 mm

Fuente: Gonçalves y Sentelhas (2008); Toledo *et al.* (2009) y Maes *et al.* (2009).

Para realizar la zonificación agroclimática, se utilizó la base de datos del programa ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica), (IMTA, 2003), reportando para el estado de Tabasco 93 estaciones meteorológicas, sin embargo, para nuestro estudio únicamente se seleccionaron 35 estaciones (Tabla 2), ya que el resto de las estaciones presentó inconsistencia en sus datos. De las estaciones meteorológicas seleccionadas se creó la base de datos de clima, considerando para ello la información de series históricas a nivel diario, como es temperaturas mínimas y máximas, precipitación y evaporación (periodo de 1950 a 2003).

Tabla 2. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas selectas en el estado de Tabasco para zonificación agroclimática del cultivo de la *Jatropha curcas L.*

Municipios	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Balancán	Apatzingán	17°35'59.23"	91°04'30.00"	65
	Balancán	17°48'35.23"	91°32'12.23"	18
	El Triunfo	17°25'23.24"	91°29'42.23"	60
	San Pedro	17°56'33.26"	92°01'28.73"	40
Cárdenas	Campo EW-75	17°58'59.22"	93°34'59.92"	8
	Cárdenas	17°59'59.22"	93°22'59.94"	21
Centla	Vicente Guerrero	18°24'19.20"	93°21'59.95"	8
Centro	Macultepec	18°04'29.20"	93°10'29.97"	10
	Pueblo Nuevo	17°36'47.25"	92°47'54.03"	60
	Villahermosa	17°43'59.23"	91°46'00.19"	10
Comalcalco	Comalcalco	17°50'19.23"	93°54'07.86"	20
Cunduacán	Cunduacán	18°10'17.19"	93°03'42.00"	26
	Samaria	18°04'59.19"	92°02'00.11"	17
	Tulipán	17°37'53.24"	92°32'12.07"	16
	Emiliano Zapata	17°44'29.21"	92°55"33.01"	16
Huimanguillo	Francisco Rueda	18°07'59.20"	94°01'29.84"	7
	La Venta	17°36'29.23"	92°41'00.03"	20
	Mezcalapa	18°09'59.20"	92°50'00.03"	50
	Mosquitero	17°45'23.21"	92°36'18.06"	32
	Paredón	17°37'59.21"	93°24'59.94"	12
Jalpa de Méndez	Jalpa de Méndez	17°42'59.22"	93°37'59.91"	10
Jonuta	Jonuta	17°22'29.23"	92°45'00.05"	13
Macuspana	Km 662	18°23'59.20"	93°12'00.88"	100
	Macuspana	17°45'47.23"	93°23'05.93"	60
	Tepetitán	17°49'59.20"	92°52'00.03"	10
Paraíso	Paraíso	17°59'59.21"	93°15'59.96"	0
Tacotalpa	Dos Patrias	17°47'29.24"	91°09'30.27"	60
	Lomas Alegres	17°27'47.24"	92°42'37.05"	70
	Oxolotan	17°33'47.23"	92°57'06.01"	210
	Tapijulapa	17°28'23.25"	91°25'36.23"	167
Teapa	La Huasteca	17°49'34.21"	92°23'15.09"	16
	Teapa	18°06'29.19'	93°20'41.93"	72
Tenosique	Boca del Cerro	17°59'47.20"	92°55'42.01"	100
	Tenosique	18°23'41.20"	92°54'00.03"	32
	Frontera	18°30'59.17"	92.38'00.05"	1

Inventario climático
La elaboración del inventario climático fue realizada de acuerdo con los lineamientos de FAO (1997), la cual consta de dos etapas: *a)* definición de las divisiones climáticas mayores y *b)* obtención del periodo de crecimiento del cultivo.

Divisiones climáticas mayores
Las divisiones climáticas se definieron con base en los requerimientos térmicos del cultivo, los cuales limitan su distribución a escala global. Para establecer las divisiones climáticas mayores, como primer paso, se considera el efecto de la altitud, en espacio y tiempo, sobre la temperatura media, para lo cual, las temperaturas medias mensuales se convirtieron a temperaturas a nivel del mar, con un gradiente alto-térmico de 0.6° C/100 m de elevación con el trazo de isolíneas (IMTA, 1998).

Periodo de crecimiento
Para calcular el inicio, final y duración, en días, del periodo de crecimiento del cultivo de *Jatropha curcas*, de acuerdo con la metodología de FAO (1997), se realizó el cálculo a partir de datos mensuales de precipitación y temperatura, y de evapotranspiración potencial estimados para cada estación meteorológica. Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa AGROCLIM (Aceves *et al.,* 2008).

Inventario edafológico
La segunda fase del procedimiento de zonificación agroecológica propuesto por Fischer *et al.* (2012) consiste en la evaluación del recurso suelo con base en las unidades y subunidades de suelo del sistema FAO/UNESCO. Para ello, se integraron datos cartográficos referentes a subunidades de suelos, como son textura, pendiente, profundidad del suelo y su fertilidad (Palma *et al,* (2007), cuyas propiedades edafológicas se compararon con las que requiere el cultivo de *Jatropha curcas*, de acuerdo con las recomendaciones de FAO (1994), las que se le asignaron como aptitud óptima.

Información cartográfica
La herramienta que se utilizó para la elaboración de cartografía fue el programa ArcMap GIS (ESRI, 2004), el cual consiste en un sistema de mapeo computarizado que relaciona lugares con información agroclimática igual a la del cultivo de *Jatropha curcas*, a los cuales se les denominó áreas con aptitudes. De acuerdo con la Tabla 1 se construyeron mapas a escala 1:250 000 de cada elemento climático. La interpolación para el cálculo de isolíneas se realizó con el método Kriging, incluido dentro del programa ArcMap.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generaron bases de datos para cada una de las variables bioclimáticas utilizadas y que se detallan en la Tabla 1, las bases se almacenaron en el SIG versión 9.3. Para conocer la dependencia geográfica que existe entre los valores interpolados se utilizó el método de interpolación espacial Kriging, debido a que se asocia al término de Mejor Predictor Lineal Insesgado (MPLI) y es el más adecuado en el sentido de que minimiza la varianza del error en la predicción (Castro *et al.,* 2010).

Los resultados muestran que climáticamente el estado de Tabasco dispone de temperatura y precipitación favorables para el buen desarrollo y crecimiento del cultivo de *Jatropha curcas*. En la Figura 2 se observa la distribución espacial de las temperaturas promedios mensuales máximas y mínimas de las 35 estaciones meteorológicas selectas (Tabla 1), las cuales fluctúan entre 25.6 y 28.4° C, respectivamente, y se ubican en el rango de aptitud óptima (≥ 18° C a ≤ 28.5° C).

Las temperaturas óptimas (≥ 18° C a ≤ 28.5° C) empleadas en este trabajo, fueron utilizados en diferentes estados de Brasil, para delimitar las áreas agroecológicas con alto potencial productivo y con ello obtener los máximos rendimientos del cultivo (Gonçalves y Sentelhas, 2008; Toledo *et al.*, 2009 y Dallacort *et al.* (2010). Sin embargo, en un estudio realizado en China para conocer la aptitud agroclimática de la *Jatropha curcas*, Wu *et al.* (2010) utilizaron temperatura media anual > 20° C. Por su parte, Wen *et al.* (2012) señalan que el crecimiento de las planta de *Jatropha curcas* depende de las temperaturas óptimas, ya que está altamente correlacionada con el rendimiento tanto en grano y

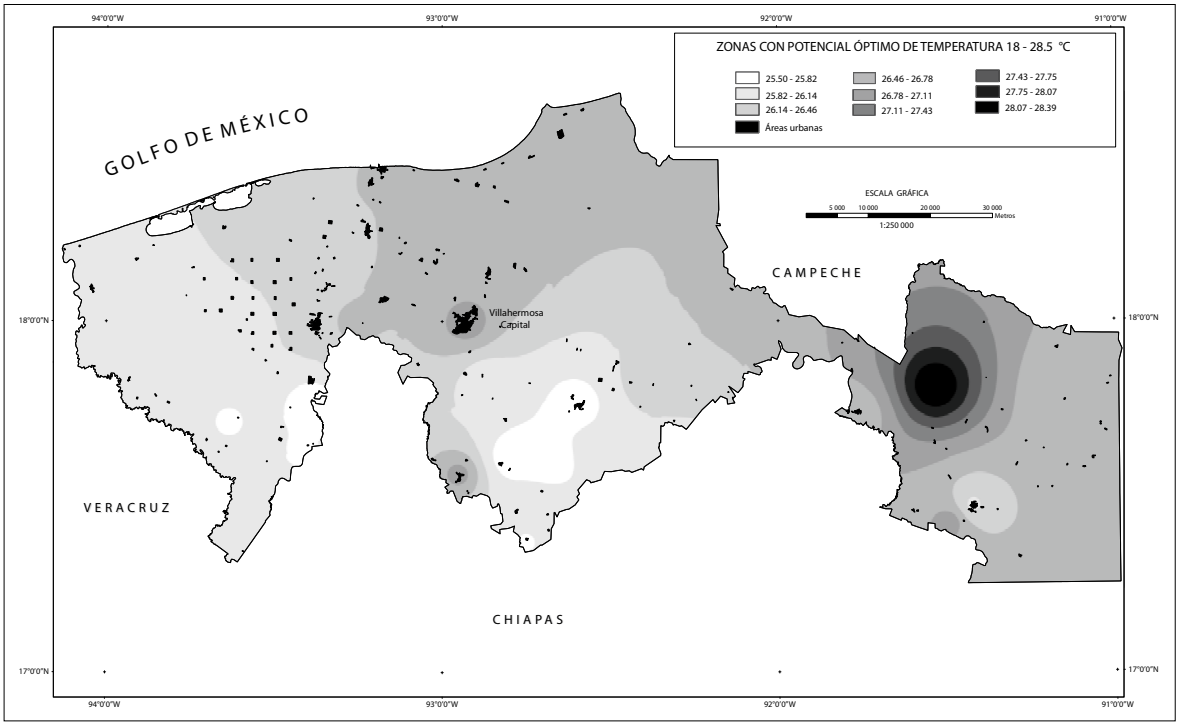

Figura 2. Distribución espacial de la temperatura óptima para cultivar *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México.

en aceite. De acuerdo con la metodología y escala utilizada en este trabajo, no se detectaron zonas en el estado de Tabasco con aptitud marginal, ni por déficit o exceso térmico, tampoco se detectaron temperaturas en el intervalo de aptitud adecuada, lo cual se debe a que la geografía física es una planicie, a excepción de la parte sur, que colinda con el estado de Chiapas, por lo que el factor climático del relieve no ejerce un cambio en el patrón de distribución de la temperatura.

En la Figura 3 se presenta el análisis promedio anual de las precipitación registrada en las 35 estaciones meteorológicas, éstas indican que el estado de Tabasco cuenta con una superficie de 2 229 631 ha con aptitud óptima para cultivar *Jatropha curcas*, lo cual equivale a un 90.75% (1 200-2 500 mm) de la superficie total del estado. En este estudio no se detectaron áreas con aptitud marginal por déficit hídrico, ni para aptitud adecuada, aunque sí se detectaron áreas con aptitud marginal por exceso de lluvia, las cuales representan el 9.25% (>2 500) de superficie restante, que se localizan al sur del estado; Tacotalpa, Teapa, Jalapa, Macuspana y una pequeña porción de municipio de Huimanguillo son los municipios donde se localiza esta superficie.

Las superficie con aptitud óptima desde el punto de vista hídrico (1 200-2 500 mm) del estado de Tabasco cumple con los requerimientos que mencionan Martínez *et al.* (2010) y Possas *et al*. (2012). En estudios realizados por Trabucco *et al*. (2010) y retomados por Muzondiwa (2012), indican que la precipitación promedio anual óptima para la *Jatropha curcas* es de 1 500 mm. Según Maes *et al.* (2009) con precipitaciones medias anuales de 1 800 a 2 400 mm se puede obtener una producción de hasta 5 t año^{-1} de semilla seca. Por su parte, Openshaw (2000) señala que el crecimiento de las plantas de *Jatropha curcas* depende de la fertilidad del suelo y la lluvia, especialmente de esta última, ya que la floración está altamente correlacionada con la precipitación, y con una temporada de lluvias por año solo se puede obtener una fructificación por año, mientras que para cultivos de regadío se pueden obtener hasta tres fructificaciones al año.

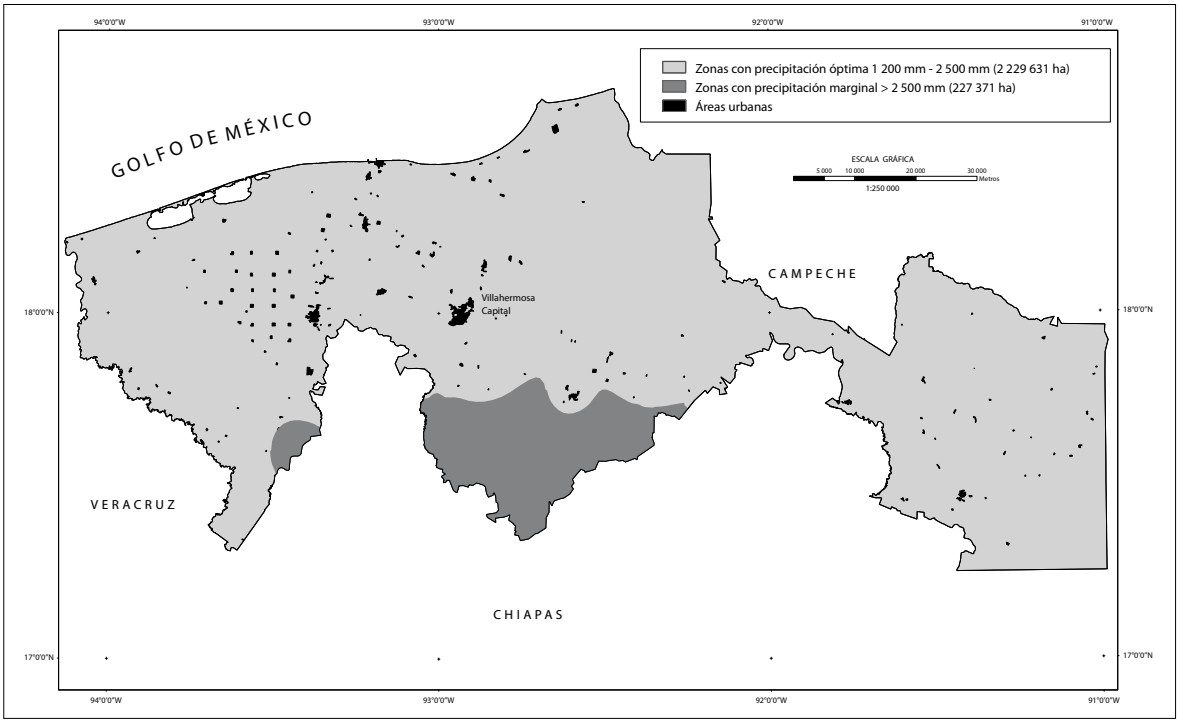

Figura 3. Distribución espacial de la precipitación óptima para cultivar *Jatropha curcas* L.*,* en Tabasco, México.

Con el uso del software ArcMap GIS se realizó el álgebra de mapas de temperaturas máximas y mínimas, precipitación y periodo de crecimiento, con lo que se obtuvieron las áreas con alto potencial agroclimático para el cultivo de *Jatropha curcas* en el estado de Tabasco, las cuales abarcan 2 229 631 ha (Figura 4).

De las 81 subunidades de suelo para Tabasco reportadas por Palma *et al.* (2007), únicamente 37 presentan un alto potencial productivo para cultivar la especie. Éstas, en conjunto, suman una superficie de 945 462 82 ha. En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de las subunidades de suelos en el estado de Tabasco y en la Tabla 3 se citan las subunidades de suelo y la superficie de cada una con alto potencial edáfico.

Las subunidades de suelos de la Tabla 3 cumplieron con las propiedades físicas y químicas de suelos que requiere el cultivo de *Jatropha curcas,* al compararlas con las propiedades de suelo que la FAO (1994) recomienda como básicas para determinar zonas con alta potencialidad. Sin embargo, las 47 subunidades restantes de suelos del estado de Tabasco, no son aptas para establecer este cultivo, debido a que la mayor parte del año presentan problemas de inundación.

El cultivo de *Jatropha curcas* prefiere suelos de textura media y bien drenada, ya que en suelos pesados la formación de raíces se ve limitados (Odalys *et al*., 2008). Ejemplificando las subunidades de los Histosoles (Hs), Solonchak y algunos fluvisoles (no aptas para el cultivo) la mayor parte del año presentan problemas de inundación y únicamente están libres de manto freático en la superficie de 30 a 40 días (Barba *et al.,* 2006 y Palma *et al.,* 2007).

Al realizar el álgebra de mapas de áreas con alto potencial agroclimático (Figura 4) y edafológico (Figura 5), se obtuvo el mapa de zonas con aptitud óptima edafoclimática (clima y suelo) del estado de Tabasco, el cual tuvo como resultado una superficie de 833.181 ha, que se distribuyen en 16 municipios. En la Figura 6 se muestra la distribución espacial de las zonas con aptitud óptima edafoclimática para cultivar *Jatropha curcas*. Y en la Tabla 4 se ob-

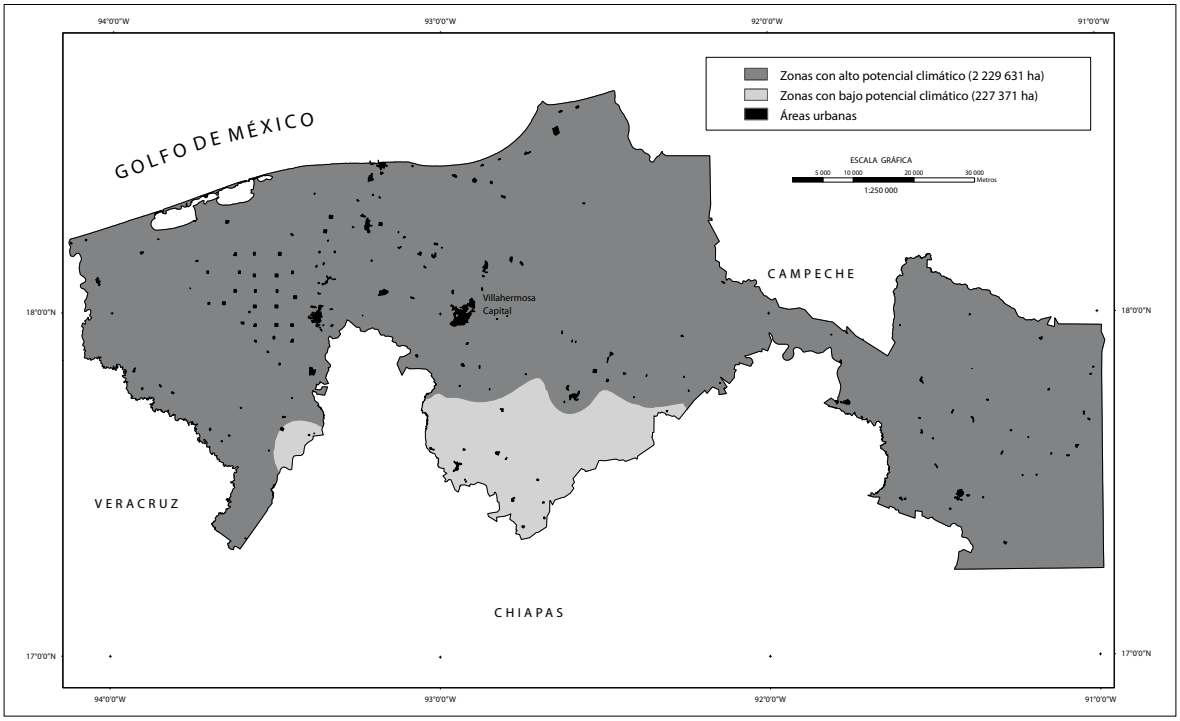

Figura 4. Zonas con alto potencial agroclimático para el cultivo de la *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México.

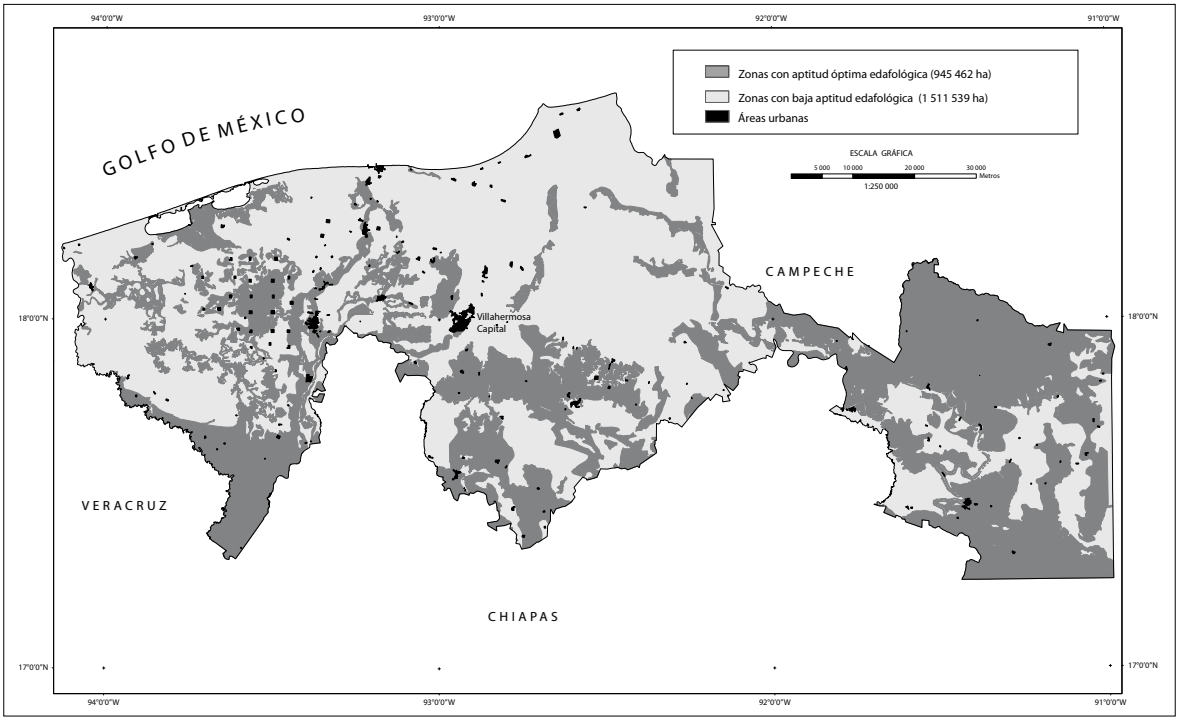

Figura 5. Zonas con alto potencial edafológico para producir *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México.

Tabla 3. Subunidades de suelo con alto potencial productivo para cultivar *Jatropha curcas* L. en Tabasco, México

Nombres	Clave	Superficie (ha)
Fluvisol éutrico	FLeu	21 0957.71
Fluvisol éutrico, Vertisol Crómico	FLeu-VRcr	2 211.54
Regosol dístrico	RGdy	3 788.05
Acrisol húmico, acrisol plíntico	AChu-ACpl	2 254.12
Alisol húmico	ALhu	1 777.9
Alisol húmico, alisol gléyico	ALhu-ALgl	687.79
Alisol húmico, alisol plíntico	ALhu-ALpl	2 040.08
Acrisol férrico	ACfr	60 514.03
Acrisol háplico	ACha	8 893.21
Alisol férrico	ALfr	873.96
Alisol férrico, alisol háplico	ALfr-ALha	997.9
Alisol férrico, gleysol mólico	ALfr-GLmo	209.09
Alisol háplico	ALha	406.21
Plintosol éutrico	PTeu	3 7187.74
Plintosol úmbrico	PTum	3 045.25
Regosol úrbico	RGub	5 722.35
Regosol úrbico, gleysol mólico	RGub-GLmo	2 387.36
Regosol úrbico, histosol sáprico	RGub-HSsa	116.98
Gleysol plíntico	GLpl	12 870.79
Leptosol lítico, leptosol réndzico, vertisol éutrico	LPli-LPrz-VReu	25 671.48
Leptosol réndzico	LPrz	156 775.95
Leptosol réndzico, leptosol lítico	LPrz-LPli	43 772.73
Leptosol réndzico, vertisol éutrico	LPrz-VReu	3 6039.3
Fluvisol dístrico	FLdy	1 160.98
Fluvisol dístri-gléyico	FLdygl	428.2
Cambisol éutrico	CMeu	739.33
Cambisol éutri-calcárico	CMeuca	14 192.46
Fluvisol dístrico	FLdy	1 160.98
Fluvisol eutri-calcárico, gleysol mólico	FLeuca-GLmo	5 608.6
Vertisol crómico, fluvisol éutrico	VRcr-FLeu	11 161.13
Luvisol crómico	LVcr	154 498.91
Luvisol crómico, acrisol plíntico	LVcr-ACpl	16 803.27
Luvisol cromico, alisol gléyico	LVcr-ALgl	2 520.36
Luvisol gléyico	LVgl	7 8013.3
Luvisol háplico	LVha	14 638.81
Arenosol hipoluvico	ARlvw	15 928.56
Ferralsol ródico	FRro	9 406.41

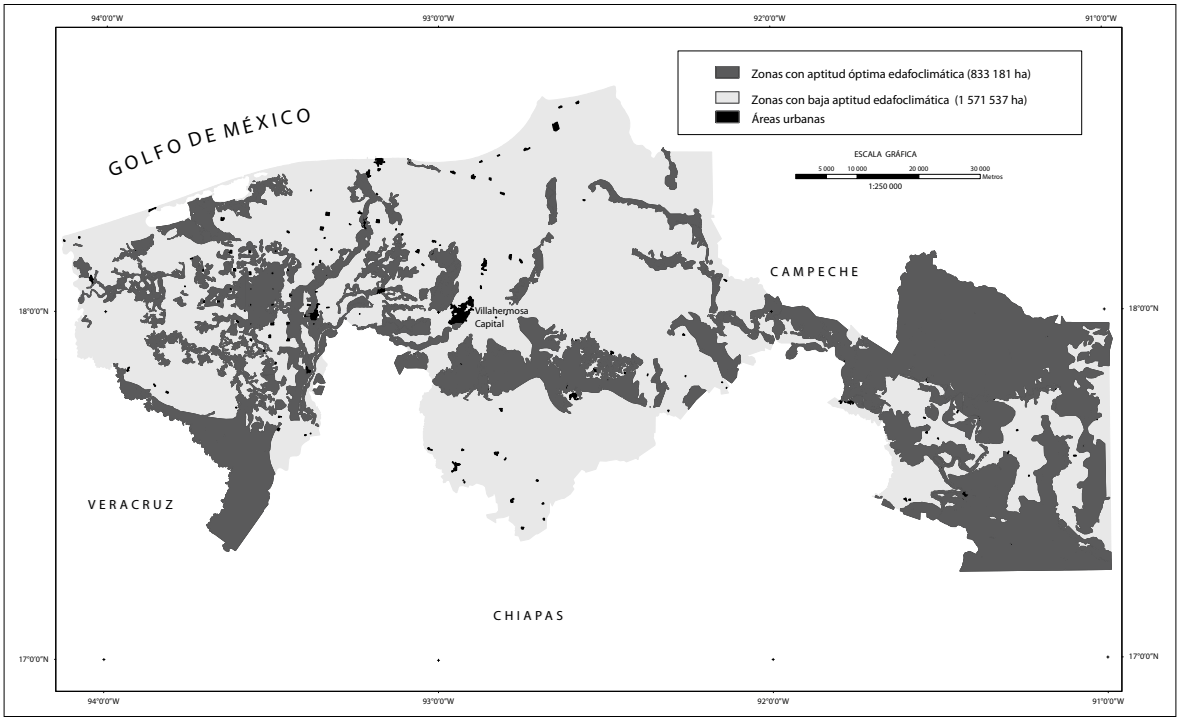

Figura 6. Zonas con aptitud óptima edafoclimática para cultivar *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México.

Tabla 4. Superficies municipales con aptitud óptima edafoclimática para cultivar *Jatropha curcas* L., en el estado de Tabasco, México

Municipio	Superficie (ha)
Balancán	256 201.58
Cárdenas	68 267.84
Centla	13 573.15
Centro	43 356.76
Comalcalco	4 838.51
Cunduacán	16 556.78
Emiliano Zapata	31 225.24
Huimanguillo	131596.22
Jalapa	21 501.23
Jalpa de Méndez	5 207.43
Jonuta	48 081.98
Macuspana	45 545.00
Nacajuca	10 454.45
Paraíso	6 027.57
Teapa	38.98
Tenosique	130708.29

serva la superficie con aptitud óptima edafoclimática por municipios, donde la mayor área se localiza en cuatro municipios: Balancán (256 201 ha), Huimanguillo (131 596 ha), Tenosique (130 708 ha) y Cárdenas (68 267 ha); Teapa (38 ha) es el municipio con menor superficie.

CONCLUSIONES

El estado de Tabasco presenta rangos con aptitud óptima para cultivar *Jatropha curcas* y no se detectaron zonas con aptitud marginal, ni por déficit o exceso térmico, tampoco se detectaron temperaturas en el rango de aptitud adecuada, lo cual se debe a que la geografía física del estado de Tabasco, que es una planicie, a excepción de la parte sur que colinda con el estado de Chiapas.

Con el análisis de la precipitación promedio de las 35 estaciones meteorológicas, se encontró que en el estado de Tabasco existe una superficie de 2 229 631 ha con aptitud óptima, desde el punto

de vista hídrico para cultivar *Jatropha curcas*.

Al realizar el álgebra de mapas de temperaturas máximas y mínimas, precipitación y periodos de crecimiento, se obtuvo una superficie de 2 229 631 ha con alto potencial agroclimático.

De las 81 subunidades de suelo reportadas para el estado de Tabasco, únicamente 37 de ellas presentan alto potencial productivo para *Jatropha curcas,* sumando una superficie de 945 462 ha.

En el estado de Tabasco existen zonas con aptitud óptima edafoclimática para cultivar *Jatropha curcas,* que abarcan una superficie de 833 181 ha, siendo los municipios con mayor superficies Balancán (256 201 ha) y Huimanguillo (131 596 ha).

REFERENCIAS

Aceves Navarro, L. A., R. A. Arrieta y O. J. L. Barbosa (2008), *Manual de AGROCLIM 1.0*, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, H. Cárdenas, Tabasco, México.

Achten, W. M. J., L. Verchot, Y. J. Franken, E. Mathijs, V. P. Singh, R. Aerts and B. Muys (2008), "Jatropha bio-diesel production and use", *Biomass & Bioenergy*, no. 32, pp. 1063-1084.

André, S. Y., A. L. Pereira, F. F. S. Silva, R. R.C. Riebeiro, M. R. V. Evangelista, R. D. Castro e B. F. Dantas (2010), "Efeito da salinidade na germinação de sementes e no crescimento inicial de mudas de pinhão-manso", *Revista Brasileira de Sementes*, no. 32, pp. 83-92.

Barba Macías, E., J. Rangel Mendoza y R. Ramos Reyes (2006), "Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica", *Universidad & Ciencia*, vol. 22, no. 2, pp. 101-110.

Behera, S. K., P. Srivastava, R. Tripathi, J. P. Singh and N. Singh (2010), "Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass-A case study", *Biomass and Energy*, no. 34, pp. 30-41.

Castro, F., J. E. Pezzopane, R. A. Cecilio, J. R. M. Pezzopane e A. C. Xavier (2010), "Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico", *Revista Brasleira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 14, no. 8, pp. 871-880.

CATIE (2008), Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica.

CONAGUA (2011), *Estadística del agua en México*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México.

Dallacort, R. J. A., M. H. Martins, P. S. Inoue e W. K. Lourenço (2010), "Aptidão agroclimática do pinhão manso na região de Tangará da Serra, MT", *Revista Ciencia Agronómica*, vol. 5, no. 3, pp. 373-379.

ESRI (2004), *ArcGIS 9.3 Getting Started With ArcGIS*, Environmental System Research Institute, Sistema de información, USA.

Falasca, S y A. Ulberich (2008a), "Las especies del género *Jatropha* para producir biodiesel en Argentina", *Revista REDESMA*. Biocombustibles, vol. 2, núm. 1, pp. 1-19.

Falasca, S. L y A. Ulberich (2008b), "Potencialidad bioenergética sudamericana a partir de forestaciones con *Jatropha* sp. (J. *curcas*, hieronymi y macrocarpa)", *Revista Virtual REDESMA*, vol. 2, núm. 2, pp. 101-115.

FAO (1994), *ECOCROP 1. The adaptability level of the* FAO *crop environmental requirements database. Versión 1.0*, AGLS, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy [http://www.ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropFindForm: consultado en febrero de 2012].

FAO (1997), *Zonificación Agro-ecológica*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos Boletín de Suelos número 73, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas [http://www.fao.org/docrep/w2962s/w2962s00.htm (Consultado en enero de 2012)].

Fischer, G., F. Nachtergaele, S. Prieler, E. Teixeira, G. Tóth, V, Harrij, L. Verelst and D. Wiberg (2012), *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

García, E. (2004), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Ghilardi, A. G. Guerrero, E. Riegelhaupt y O. Probst (2008), "Disponibilidad del potencial de biomasa para producir energía en México: escenarios de penetración al 2040", *Memoria electrónica de la V Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía*, Centro de Investigación en Ecosistema (CIECO), UNAM, 29-30 de septiembre, Morelia, Michoacán.

Gonçalves, M. B. e P. C. Sentelhas (2008), "Zoneamento agroclimático do pinhão-manso no estado da Bahia, objetivando a produção de biocombustíveis", en UNESCO; MBC; RECYT Mercosul; CNPQ; PETROBRAS (org.), Biocombustíveis para o Mercosul, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, no. 1, pp. 121-140.

Heller J. (1996), *Physic nut. Jatropha curcas L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1*, Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben, International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, p. 66.

IMTA (1998), *Meteorología y fenómenos meteorológicos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

IMTA (2003), *ERIC III. Extractor Rápido de Información Climatológica v.1.0*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [cd-rom].

Jiménez, C. A., T. V. Vargas, C. W. E. Salinas, M. J. B Aguirre y C. D. Rodríguez (2004), "Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 53, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 58-74.

Maes, W. H., W. M. J. Achten, B. Reubens, D. R. Raes and B. Muys (2009), "Plant water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. mseedlings under different level of drought stress", *Journal of Arid Environments*, no. 73, pp. 877-884.

Martínez, H. J., A. A. L. Martínez, H. Makkar, G. Francis and K. Becker (2010), "Agroclimatic conditions, chemical and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico", *European Journal of Scientific Research*, vol. 39, no. 3, pp. 396-407.

Muzondiwa, J. R. (2012), "Socio-economy, agro-ecological zones, agronomic practices and farming system of *Jatropha curcas* L. in Sub-Saharan Africa" in Carels N., B. Bahadur and M. Sujata (eds.), *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop*, Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, Zimbabwe, cap. iv, no. 1, New York, pp. 53-59.

Odalys, C. T., J. M. Iglecias, O. S. Montes, J. A. Sotolongo, S. Garcia y M. Torsti (2008), "*Jatropha curcas* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba", *Pastos y Forrajes*, vol. 31, núm. 3, pp. 191-207.

Openshaw, K. (2000), "A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfullled promise", *Biomass and Bioenergy*, no. 19, pp. 1-15.

Palma, L. D. J., D. E. Cisneros, C. E. Moreno y J. A. Rincón (2007), *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*, Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FRUPROTAB, Villahermosa, Tabasco, México.

Possas, J. M. C., M. M. Correa, M. A. B. Geber, P. M. O. O. Lopes, A. M. Caldas e R.V. P. Fontes (2012), "Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhãomanso no Estado de Pernambuco", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 16, no. 9, pp. 993-998.

Rodríguez Acosta, M., K. Vega Flores, V. H. Gante Cabrera y J. Jiménez Ramírez (2009), "Distribución del género *Jatropha* L. (euphorbiaceae) en el estado de Puebla, México", *Polibotánica*, núm. 28, pp. 37-48.

SIAP-SAGARPA (2012), *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 Fecha de consulta: diciembre, 2013].

Solís, G. B. F. (2011), *Integración de Jatropha curcas L. en agroecosistemas como materia prima para biodiesel en la región centro de Chiapas, México*, tesis Doctoral, Colegio de Postgraduados, campus Veracruz, México.

Tiwari, A. K, A. Kumar and H. Raheman (2007), "Biodiesel production from *Jatropha* (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process", *Biomass and Bioenergy*, no. 31, pp. 569-575.

Toledo, J .V., M. L. Deleon, K. V. Hollunder, P. J. E. Macedo, M. A. Tomaz, D. O. e A. A. F. Teixeira (2009), "Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhãomanso (Jatropha curcas L.) e da mamona (Ricinus communis L.) no estado do Espírito Santo", *ACSA-Agropecuária Científica no Semi-Árido*, vol. 2, no. 05, pp. 41-51.

Trabucco, A., W. M. J. Achten, C. Bowe, R. Aerts, J. van Orshoven and L. Norgrove (2010), "Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fi tness to present and future climate", *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 2, no. 3, pp. 139-151.

Wen, Y., M. Tang, D. Sun, H. Zhu, J. Wei, F. Chen and L. Tang (2012), "Influence of climatic factors and soil types on seed weight and oil content of *Jatropha curcas* in Guangxi, China", *Procedia Environmental Sciences*, no. 12, pp. 439-444.

White, D. H., G. Lubulwa, K. Menz, H. Zuo, W. Wint and J. Slingenbergh (2001), "Agroclimatic classification systems for estimating the global distribution of livestock numbers commodities", *Environment International*, no. 27, pp. 181-187.

Wu, W. G., Huang J. K. and X. Z. Deng (2010), "Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstock for biodiesel in China", *Science China Earth Sciences*, vol. 53, no. 1, pp. 120-127.

Zamarripa, C. A. y P. G. Díaz (2008), "Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha curcas* L., como especie de interés bioenergético en México", Boletín electrónico del Comité Nacional Sistema Producto Oleaginosa [http://www.oleaginosas.org/art_211.shtml (consultado en diciembre de 2013)].