

EN

Potential areas to establish rubber plantations (*Hevea brasiliensis* Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.) in Oaxaca, Mexico

ES

Áreas potenciales para establecer plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.) en Oaxaca, México

Ramiro Pérez Miranda¹; Martín Enrique Romero Sánchez¹; Antonio González Hernández¹;
Efraín Velasco Bautista¹; Adán Guillermo Ramírez García^{2*}

¹INIFAP.Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, ave. Progreso núm. 96, Santa Catarina, Coyoacán, Ciudad de México, C. P. 04010, CDMX.

²Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario del Noroeste, Ciudad Obregón, Sonora, México.

*Corresponding author:
gramirezg@taurus.chapingo.mx

Received: July 11, 2021 /
Accepted: October 15, 2021

DOI:
10.5154/r.rchsatsat.2021.02.03

Abstract

The development of commercial forest plantations in Mexico means a great opportunity to the forestry sector because of climatic and soil conditions in the country. Growing rubber as a commercial forest plantation offers many benefits; however, the potential of this crop has not been developed due to several factors, including the lack of planning to establish it on optimal lands for its best production. The objective of this study was to estimate the potential of the land in the state of Oaxaca for the cultivation of rubber by using multi-criteria techniques and a hierarchical analysis process. The modeling was carried out from the edaphoclimatic requirements of *H. brasiliensis* and weighting of variables in a Geographic Information Systems environment. The hierarchies between the criteria to be weighted were defined with the support of specialized technicians and farmers related to the cultivation of rubber. The results indicate that the most important criterion for modeling was the climate with a weighting of 0.30 in terms of precipitation, followed by the temperatures (0.17). Based on the principles of the Multi-criteria Analysis, it was possible to state that in the optimal potential development of *H. brasiliensis*, climatic, edaphic and topographic factors are determining factors. The optimal potential for the cultivation of rubber in the state are the municipalities of Matias Romero, Juan Lana, San Juan Bautista Tuxtepec, Santiago Jocotepec and Santiago Yaveo. The methodology used is expected to serve as the basis for similar applications with other species.

Keywords: Spatial analysis, analytic hierarchy, multi-criteria analysis, process land suitability, GIS.

Resumen

El desarrollo de plantaciones forestales comerciales en México es una gran oportunidad para el sector forestal, debido a las condiciones climáticas y edafológicas que presenta el país. El cultivo del hule como plantación forestal comercial, ofrece muchos beneficios; sin embargo, no se ha desarrollado el potencial de este cultivo debido a diversos factores, entre los que se encuentra la falta de planeación para establecerlo en tierras óptimas



Please cite this article as follows (APA 6): Pérez Miranda, R., Romero Sánchez, M. E. González Hernández, A., Velasco Bautista, E., & Ramírez García, A.G. (2021). Potential areas to establish rubber plantations (*Hevea brasiliensis* Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.) in Oaxaca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 1(2), 25-40. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsatsat.2021.02.03>

para su mejor producción. El objetivo del presente estudio fue estimar la aptitud del terreno en el estado de Oaxaca para establecer el cultivo del hule mediante el uso de técnicas multicriterio y proceso de análisis jerarquizado. La modelación se realizó a partir de los requerimientos edafoclimáticos de *H. brasiliensis* y ponderación de variables en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica. Las jerarquías entre los criterios por ponderar se definieron con el apoyo de técnicos especializados y de agricultores relacionados con el cultivo del hule. Los resultados señalan que el criterio más importante para la modelación fue el clima con una ponderación de 0.30 en precipitación, seguido por las temperaturas (0.17). Con base en los principios del Análisis Multicriterio, fue posible manifestar que en el desarrollo potencial óptimo de *H. brasiliensis* son determinantes los factores climáticos, edáficos y topográficos. El potencial óptimo para el cultivo del hule en el estado, son los municipios de Matías Romero, Juan Lana, San Juan Bautista Tuxtepec, Santiago Jocotepec y Santiago Yaveo. Se espera que la metodología empleada sirva de base para aplicaciones similares con otras especies.

Palabras clave: Análisis espacial, análisis multicriterio, aptitud de terreno, proceso de análisis jerarquizado, SIG.

Introduction

The rubber tree [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.)] is an endemic specie from the rainforests of the Amazonia (Rojo M., G. E., Martínez R., R., & Jasso M., J., 2011), it is naturally distributed in Bolivia, Brazil, Colombia, Ecuador, Perú, and Venezuela (Gonçalves, Ortolani, & Cardoso, 1997). It has been introduced in other tropical regions of the world, mainly, in the Asian continent, in nations such as Indonesia, India, Liberia, Malaysia, Sri Lanka, as well as in some parts of Latin America such as Guatemala and Mexico, among others (Shultes y Raffauf, 2009).

Hevea brasiliensis is characterized by the production of latex, a raw material for elaborating rubber or oil-cloth, a polymer with a high molecular weight used in various industries (De Dios C. O., Leshner G., J. M., Álvarez M. I., Molina M., R. F., & Jiménez G. F., 2015). The latex is a product that recently has increased its importance (Ray, D., Behera, M. D., & Jacob, 2018) because the by-products made with this material, do not have a synthetic substitute with the same quality.

Mexico has the optimum soil and climatic conditions to establish rubber plantings in the states of Veracruz, Oaxaca, Chiapas and Tabasco, which have been highlighted because of their potential to produce rubber (Rojo M., et al., 2011). However, despite that potential, rubber production has been very low compared to expectation (SIAP, 2020).

Despite the existence of optimal ecological conditions for growing rubber and its industrial and economic meaning, the information about the productive potential of this specie, is limited; for this, it is necessary to develop studies that allow to precisely discriminate

Introducción

El árbol de hule [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.)] es una especie endémica de las selvas tropicales de la Amazonia (Rojo M., G. E., Martínez R., R., & Jasso M., J., 2011) que se distribuye de forma natural en Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, y Venezuela (Gonçalves, Ortolani, & Cardoso, 1997). Se ha introducido en otras regiones tropicales del mundo, principalmente, en el continente asiático, en naciones como Indonesia, India, Liberia, Malasia, Sri Lanka, y en algunas partes de América Latina como Guatemala y México, entre otros (Shultes y Raffauf, 2009).

Hevea brasiliensis se caracteriza por producir látex, materia prima para la elaboración de caucho o hule, un polímero de alto peso molecular muy utilizado en varias industrias (De Dios C. O., Leshner G., J. M., Álvarez M. I., Molina M., R. F., & Jiménez G. F., 2015). El látex resulta ser un producto cuya importancia se ha incrementado en los últimos años (Ray, D., Behera, M. D., & Jacob, 2018) ya que los subproductos que se elaboran con este material no tienen un sustituto sintético de igual calidad.

México posee las condiciones de suelo y clima óptimas para establecer plantaciones de hule en los estados de Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Tabasco, que han sido señalados por su potencialidad para producción de hule (Rojo M., et al., 2011). Sin embargo, a pesar de ese gran potencial, la producción de hule ha sido muy pobre con respecto a lo esperado (SIAP, 2020).

A pesar de la existencia de condiciones ecológicas óptimas para el cultivo del hule y su importancia industrial y económica, la información sobre el potencial productivo de la especie es limitado; por lo que es necesario desarrollar estudios que permitan

areas with greater aptitude to establish plantations of this tree (Aguirre & Santoyo, 2013; Díaz et al., 2012; Moctezuma, 2019).

In the past, methods used for zoning and identifying optimum zones, were focused on the soil components of the land evaluation, this tradition procedure was the Boolean classification. Nowadays, the soil assessment models must consider new uses and factors that require the evaluation of the natural, economic and social resources. There are different methods, among them the Land Evaluation and Site Assessment (Wright, L. E., Zitzmann, W., Young, K., & Googins, R., 1983), Fertility Capability Classification (Sanchez, P. A., Palma, Ch. A., & Buolb, S. W., 2003); the method of the FAO that uses soil and climate variables and management practices; the Agro-Ecological Zoning methodology (FAO, 1978); or those based on dynamic crop simulation models, neuronal networks, expert systems or with multi-criteria evaluation methods, such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) (Santé & Crecente, 2005).

In recent years, the potential assessment or land suitability to develop tree species, have been carried out through simple mapping techniques, such as the Boolean method assisted with Geographic Information Systems (GIS) (Flores & Moreno, 1994). Recently, more complex methodologies have been implemented in several studies, these are based on the concept of the Multi-criteria Decision Analysis, among which are the studies of Delgado C., C. E., Valdez L., J. R., Fierros G., A. M., de los Santos P., H. M., & Gómez G., A. (2010); Pineda-Jaimes et al., (2012); Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & Martínez-Trinidad (2019); Hernández et al. (2020); Bravo-Bello, J. C., Martínez-Trinidad, T., Romero-Sanchez, M. E. Valdez-Lazalde, J. R., & Benavides-Meza, H. (2020); Pham et al. (2021).

The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a multi-criteria method, in which a technique to classify and weigh criteria, is developed regarding their relationship and meaning, through a Pairwise Comparison Matrix (Ceballos S., A., & López B. J., 2003; Brunelli, 2015; López-Upton, J., Valdez-Lazalde, J. R., Ventura-Ríos, A., Vargas-Hernández, J. J., & Guerra-de-la-Cruz, V., 2015). This tool is used in different areas, it is applied in the case of the land suitability, mainly, to identify potential areas (Van Ranst E., Tang H., Groennemans R., & Sinthurahat S., 1996; García N. H., García R., D. R., Moreno S., R., López B., J., & Villers R., M. L, 2001; Ceballos S., A., & López B. J., 2003).

In recent years, the interest in plantations of *H. brasiliensis* has emerged because, the physicochemical

discriminar, de manera precisa, las áreas con mayor aptitud para el establecimiento de plantaciones de este árbol (Aguirre & Santoyo, 2013; Díaz et al., 2012; Moctezuma, 2019).

Los métodos empleados para la zonificación e identificación de zonas óptimas, en el pasado, se centraban en el componente edafológico de la evaluación de tierras, cuyo procedimiento tradicional era la clasificación booleana. Actualmente, los modelos de evaluación de tierras deben considerar nuevos usos y factores que exigen la valoración de los recursos naturales, económicos y sociales. Existen diferentes métodos, entre ellos el Land Evaluation and Site Assessment (Wright, L. E., Zitzmann, W., Young, K., & Googins, R., 1983), Fertility Capability Classification (Sanchez, P. A., Palma, Ch. A., & Buolb, S. W., 2003); el método de la FAO que utiliza variables de clima, suelo y prácticas de manejo; la metodología de Zonificación Agroecológica (FAO, 1978); o bien, aquellos que se basan en modelos dinámicos de simulación de cultivos, redes neuronales, sistemas de expertos o por métodos de evaluación multicriterio, como el Analytic Hierarchy Process (AHP) (Santé & Crecente, 2005).

En los últimos años, la evaluación de la potencialidad o aptitud de terrenos para el desarrollo de especies arbóreas se ha realizado mediante técnicas cartográficas simples, como el método Booleano asistido con Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Flores & Moreno, 1994). Recientemente, en diversos estudios se han implementado metodologías más complejas, basadas en los conceptos del Análisis de Decisión Multicriterio, entre los que se mencionan los trabajos de Delgado C., C. E., Valdez L., J. R., Fierros G., A. M., de los Santos P., H. M., & Gómez G., A. (2010); Pineda-Jaimes et al., (2012); Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & Martínez-Trinidad (2019); Hernández et al. (2020); Bravo-Bello, J. C., Martínez-Trinidad, T., Romero-Sanchez, M. E. Valdez-Lazalde, J. R., & Benavides-Meza, H. (2020); Pham et al. (2021).

El Proceso Analítico Jerarquizado (AHP, Analytic Hierarchy Process) es un método multicriterio, en el cual se desarrolla una técnica para la clasificación y ponderación de los criterios, con respecto a su relación e importancia, mediante una matriz de comparación por pares (Ceballos S., A., & López B. J., 2003; Brunelli, 2015; López-Upton, J., Valdez-Lazalde, J. R., Ventura-Ríos, A., Vargas-Hernández, J. J., & Guerra-de-la-Cruz, V., 2015). Esta herramienta se utiliza en distintas áreas, para el caso de la aptitud de tierra se aplica, principalmente, en la identificación de áreas potenciales (Van Ranst E., Tang H., Groennemans R., & Sinthurahat S., 1996; García N. H., García R., D. R., Moreno S., R., López B., J., & Villers R., M. L, 2001; Ceballos S., A., & López B. J., 2003).

characteristics of its latex are not yet been surpassed by synthetic materials available in the market to manufacture surgical items (Kerche-Silva, L. E., Cavalcante, Dalita, G. S. M., & Job, A. E., 2017; Aguirre & Santoyo, 2013).

In this context, the Mexican Southeast has suitable natural conditions to develop rubber plantations. However, the information available about the productive potential of this specie is insufficient to be used by planters; additionally, it is difficult to have the exact location of potentially suitable zones to grow at small work scales showed in the studies of Díaz J. J., Aguirre R. C., and Rendón M. R. (2013) and Rojo M., et al. (2011). Consequently, it is necessary to develop studies that allow a precise discrimination of the most suitable areas to establish plantations, as part of a strategy to maximize their chances of success. Therefore, this study was aimed at estimating the land potential in the state of Oaxaca to grow rubber with the use of multi-criteria techniques and hierarchical analysis process.

Methodological approach

Study area

It is located in the southern part of Mexico, with a territory of 93 757 km², which represents the 4.78 % of the national surface. In the north, it borders Veracruz and Puebla, in the south, it borders the Pacific Ocean, in the east, Chiapas and in the west, Guerrero. The state is composed of 570 municipalities (Figure 1).

Sub-humid climates predominate in the state (INEGI, 2008), with an average annual temperature higher than 18 °C; sub-humid warm with an average annual temperature between 12 and 18 °C. In the region of Papaloapan, in the main area with rubber cultivation in Oaxaca, the two first types of climates are the dominant ones. The average annual rainfall varies from 300 to 5 000 mm; although in general, values are localized between 1 000 and 3 000 mm. In the northern and southern part of the state, there are located the largest amount of rubber cultivations, the annual rainfall is of 2 000 to 3 500 mm (Fernández E., A., Romero C., R., & Zavala H., J. 2012).

The types of dominant vegetation are jungles, forests and grasslands, in addition to certain parts with agriculture, which are distributed in a dispersed manner, from them, the most representative ones are in the southeast, center and north of the state (INEGI, 2015a). The types of soils in the state are the Regosols that predominate in the western region; these are characterized because they are underdeveloped and

En los últimos años ha resurgido el interés por las plantaciones de *H. brasiliensis*, debido a que las características fisicoquímicas que posee su látex aún no son superadas por los materiales sintéticos que existen en el mercado para manufacturar productos quirúrgicos (Kerche-Silva, L. E., Cavalcante, Dalita, G. S. M., & Job, A. E., 2017; Aguirre & Santoyo, 2013).

En este contexto, el sureste mexicano goza de condiciones naturales adecuadas para el desarrollo de plantaciones de hule. No obstante, la información disponible sobre el potencial productivo de la especie es insuficiente para ser empleada por los plantadores; además, resulta complejo tener la ubicación precisa de las zonas potencialmente aptas para el cultivo por las escalas de trabajo pequeñas que presentan los trabajos como la de Díaz J. J., Aguirre R. C., y Rendón M. R. (2013) y Rojo M., et al. (2011). Por lo anterior, es necesario desarrollar estudios que permitan discriminar de manera precisa las áreas con mayor aptitud para el establecimiento de plantaciones, como parte de una estrategia para maximizar sus probabilidades de éxito. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo estimar la potencialidad de terreno en el estado de Oaxaca para el cultivo del hule mediante el uso de técnicas multicriterio y proceso de análisis jerarquizado.

Enfoque metodológico

Área de estudio

Se localiza en la parte sur de la república mexicana, con una extensión de 93 757 km², que representan 4.78 % del territorio nacional. Limita al norte con Veracruz y Puebla, al sur con el Océano Pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero. La entidad está integrada por 570 municipios (Figura 1).

En la entidad predominan los climas semicálidos subhúmedos (INEGI, 2008), con temperatura media anual mayor a 18 °C; cálido subhúmedo con temperatura media anual superior a 22 °C; y templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C. En la región del Papaloapan, es la principal zona con cultivo de hule en Oaxaca, los dos primeros tipos de climas son los dominantes. La precipitación media anual varía de 300 a 5 000 mm; aunque, en general, los valores se ubican entre 1 000 y 3 000 mm. En el norte y noreste del estado, donde se localiza la mayor cantidad de cultivos de hule, la precipitación anual es de 2 000 a 3 500 mm (Fernández E., A., Romero C., R., & Zavala H., J. 2012).

Los tipos de vegetación dominantes son selvas, bosques y pastizales, además de ciertos parches con agricultura, los cuales se distribuyen de manera dispersa,

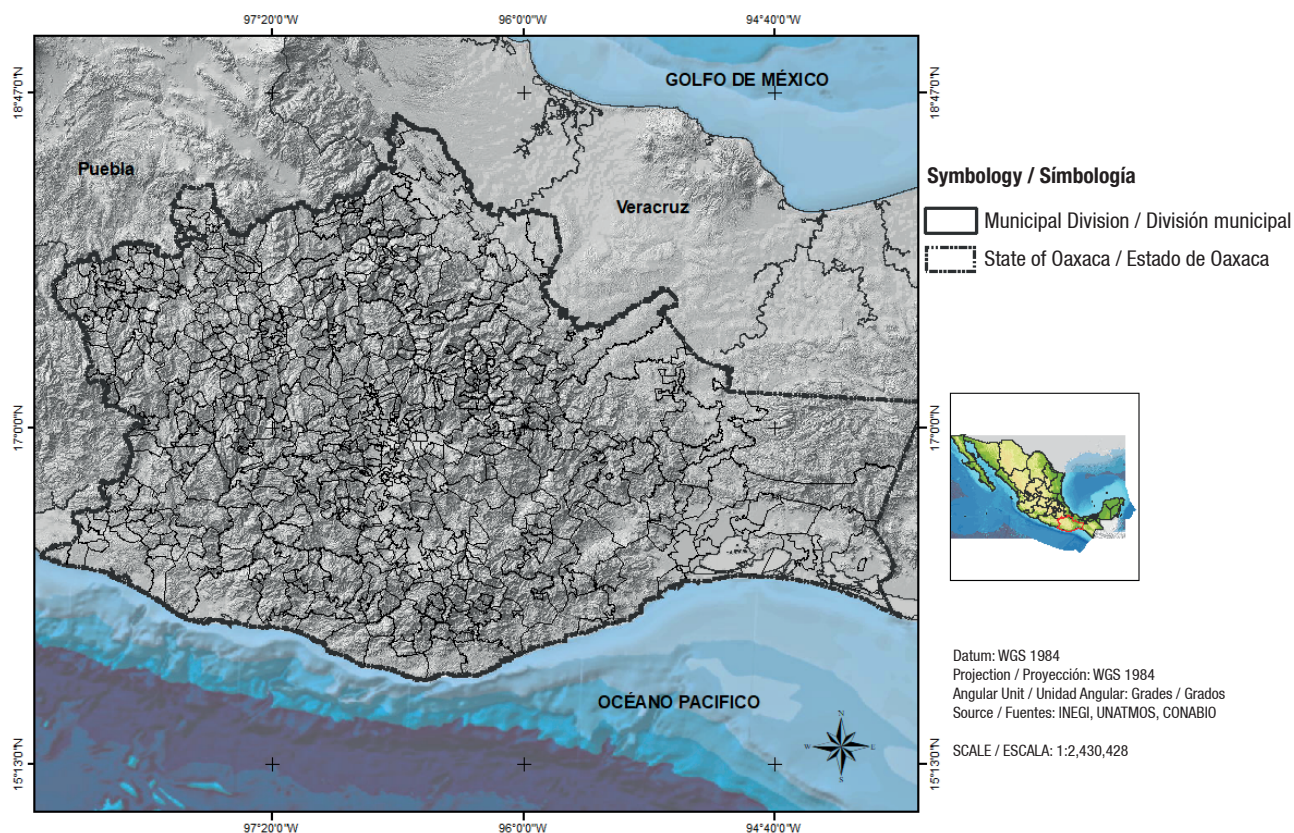


Figure 1. Geographic location of the state of Oaxaca.
Figura 1. Localización geográfica del estado de Oaxaca.

constituted by loose material similar to rocks: in the northern part and just to the east of the state, the Acrisols dominate, these are very acid, rich in clay into the subsoil and poor in nutrients; there are also parts with Litosols, very thin soils, with a thickness less than 10 cm and they are developed over a hard and continuous stratum (INEGI, 2015b).

Criteria to identify potential areas to establish rubber plantations

The methodology used was based on the previous studies of Hernández-Zaragoza, P., et al. (2019) and Bustillos-Herrera J. A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete A., and González-Guillén. M. (2007). The agroecological requirements of *H. brasiliensis* were identified from the bibliographical sources of CONAFOR (2016), Díaz J. J., et al. (2013) and Rojo M., G. E., et al. (2011). A research in different sources of digital mapping variables (maps), was carried out from the definition of the agroecological requirements, these are shown in the Table 1. For analysis purposes, the areas of interest were grouped into three categories: climate (maximum temperature,

de ellos, los más representativos se encuentran en el sureste, centro y norte de la entidad (INEGI, 2015a). Los tipos de suelos en el estado comprenden a los Regosoles, que predominan en la región oeste; estos se caracterizan por ser poco desarrollados, constituidos por material suelto semejante a la roca: En la parte norte y un poco al este de la entidad dominan los Acrisoles, los cuales son muy ácidos, ricos en arcilla en el subsuelo y muy escasos en nutrientes; también se observan parches de Litosoles, suelos muy delgados, espesor menor de 10 cm y que se desarrollan sobre un estrato duro y continuo (INEGI, 2015b).

Criterios para la identificación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de hule

La metodología empleada se basó en estudios previos de Hernández-Zaragoza, P., et al. (2019) y Bustillos-Herrera J. A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete A., y González-Guillén. M. (2007). Los requerimientos agroecológicos de *H. brasiliensis* se identificaron a partir de fuentes bibliográfica provenientes de CONAFOR (2016),

Table 1. Mapping of agroecological variables.
Cuadro 1. Cartografía de variables agroecológicas.

Layer / Capa	Scale / Escala	Source / Fuente
Minimum temperature / Temperatura mínima Maximum temperature / Temperatura máxima Medium temperature / Temperatura media	1: 1 000 000	UNIATMOS, 2019
Rainfall / Precipitación	1: 1 000 000	UNIATMOS, 2019
Edaphology / Edafología	1: 250 000	INIFAP-CONABIO, 1995
Type of climate / Tipos de clima	1: 1 000 000	García-CONABIO, 1998
Use of the soil and vegetation / Uso de suelo y vegetación	1: 250 000	INEGI, 2015a
Digital elevation model / Modelo de elevación digital	1: 50 000	INEGI, 2007

medium temperature, minimum temperature and rainfall); soil (depth, texture, edaphology); and topography (altitude and slope).

From the coverage defined to carry out the modeling, they were reclassified by using each interval corresponding to the agroecological requirements of rubber. The procedure was developed in the Geographic Information System environment ArcMap® version 10.6. Subsequently, these information layers were used in the Analytic Hierarchy Process (AHP).

Analytic Hierarchy Process (AHP) and weighted linear combination

The Multi-Criteria Evaluation (MCE) techniques to create proficiency levels to grow rubber, correspond to the combination of the AHP and the Weighted Linear Combination (WLC), whose continuous criteria (factors) are standardized within a common numeric interval, and then, are combined through a weighted average (Hernández-Zaragoza et al., 2019 and Bustillos-Herrera et al., 2007). The hierarchical structure of criteria and sub-criteria used, is shown in the Figure 2.

Hierarchies between the criteria to be weighted, were defined with the support of specialized technicians, researchers and farmers involved with the cultivation of *H. brasiliensis*. Surveys were conducted and were applied to experts during the visits mainly in development and production sites. The opinion, preferences and judgments of 17 people were considered, including researchers in the rubber system-product, producers and specialized technicians. These opinions were collected through a survey according to what was described by Malczewski (1999) and Olivas G., U. E., Valdez L., J. R., Aldrete A., González G., M. de J., and Vera, G. (2007). In these, participants pointed out their level of precedence for one criterion or sub-criterion over the other, after the side-by-side and individual

Díaz J. J., et al. (2013) y Rojo M., G. E., et al. (2011). A partir de la definición de los requerimientos agroecológicos, se realizó una búsqueda en diferentes fuentes de las variables cartográficas digitales (mapas), las cuales se pueden observar en el Cuadro 1. Para fines del análisis, las coberturas de interés se agruparon en tres categorías: clima (temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima y precipitación); suelo (profundidad, textura, edafología); y topografía (altitud y pendiente).

De las coberturas definidas para realizar la modelación, se reclasificaron empleando cada uno de los intervalos correspondientes a los requerimientos agroecológicos del hule. El procedimiento se realizó en el ambiente de sistemas de información geográfica ArcMap® versión 10.6. Posteriormente, estas capas de información fueron utilizadas en el Proceso Analítico Jerarquizado (AHP).

Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y combinación lineal ponderada

Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) para generar los niveles de aptitud para el cultivo del hule, corresponden a la conjunción del AHP y la combinación lineal ponderada (WLC), cuyos criterios continuos (factores) se estandarizan en un intervalo numérico común, y enseguida se combinan por medio de un promedio ponderado (Hernández-Zaragoza et al., 2019 y Bustillos-Herrera et al., 2007). La estructura jerárquica de los criterios y subcriterios utilizados se muestra en la Figura 2.

Las jerarquías entre los criterios por ponderar se definieron con el apoyo de técnicos especializados, investigadores y agricultores relacionados con el cultivo de *H. brasiliensis*. Se elaboraron encuestas exprofeso, las cuales se aplicaron a los expertos en visitas a los predios en desarrollo y producción, principalmente.

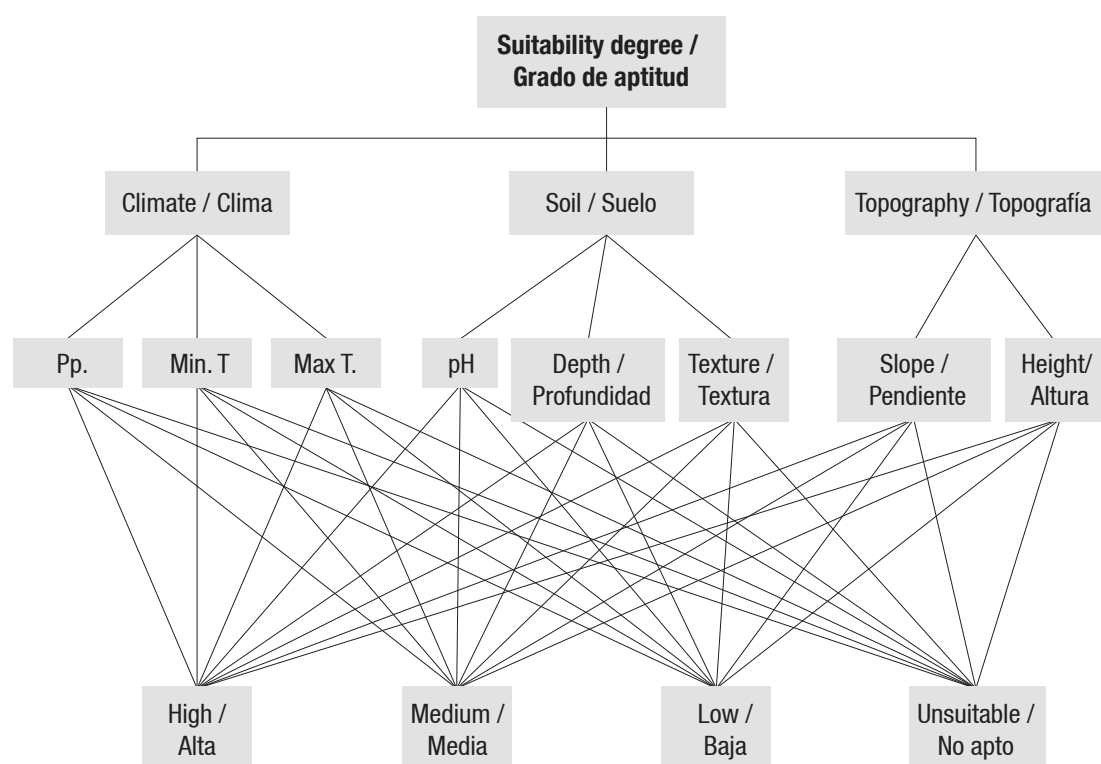


Figure 2. Hierarchical structure of criteria and sub-criteria.
Figura 2. Estructura jerárquica de criterios y subcriterios.

comparisons between the elements at one and two level of the hierarchy, by selecting a value between 1 and 9 of the fundamental scale (Saaty, 2001).

Weighted importance assignment

In order to analyze the questionnaires, these were turned into comparison matrices which were entered to the module: GIS Analysis/Decision Support/Weight of the program TerrSet® (Bravo-Bello, J. C., et al., 2020) and the respective weights for criteria and sub-criteria, were obtained, these came from each questionnaire of each participant. Once the total weight of each alternative was calculated, the AHP allowed to assess the inconsistency of the “decision-maker” at the time they shared their opinions.

Derived from the previous processing, the consistency index was also calculated to determine the robustness of the comparisons developed by the participants. From the result of this index for each questionnaire, only those whose result was equal to or less than 0.10 were considered (Saaty, 2001). Finally, in order to obtain the final weight of the criteria and sub-criteria, the arithmetic mean was used with the values from all questionnaires.

Se consideró la opinión, preferencias o juicios de 17 personas entre los que se encuentran investigadores en el sistema-producto hule, productores, y técnicos especializados. Dichas opiniones se recabaron a través de una encuesta de acuerdo con lo descrito por Malczewski (1999) y Olivas G., U. E., Valdez L., J. R., Aldrete A., González G., M. de J., y Vera, G. (2007). En ellas, los participantes indicaron su nivel de preferencia por un criterio o subcriterio sobre otro, luego de haber hecho comparaciones por pares entre los elementos de los niveles uno y dos de la jerarquía, esto de manera independiente, eligiendo un valor entre 1 y 9 de la escala fundamental (Saaty, 2001).

Asignación de importancia ponderada

Para analizar los cuestionarios, estos se transformaron en matrices de comparación que fueron ingresadas en el módulo GIS Analysis/Decision Support/Weight del programa TerrSet® (Bravo-Bello, J. C., et al., 2020) y se obtuvieron los pesos respectivos para los criterios y subcriterios provenientes de cada uno de los cuestionarios de cada participante. Una vez, calculado el peso total de cada alternativa, el AHP permitió evaluar la inconsistencia del “decisor” al momento de emitir sus juicios.

Application of the Multi-Criteria Evaluation (EMC)

The weighted coverage was built based on the methodology pointed out by Cruz B., G. M., and Sotelo R., D. E. (2013), for this, zoning maps were obtained, and these are the result of Boolean operations between the factors and each weight.

The maps generated are reclassified with the following categories: the highest suitability with a potential over 80 %, with a value of 3; the medium potential between 70-80 % with a value of 2; and the low potential corresponds to the 50-60 %, with value of 1. The areas with values lower to 50 % are omitted. Finally, the potential is limited only to the tropical humid climate and the inadequate areas for the rubber cultivation are excluded, the discarded areas were waterbodies, protected natural areas, forests, jungles and urban zones.

Results and discussion

The incorporation of the Multi-Criteria (MC) Evaluation in the decision making, offered different advantages over other methodologies to determine potential areas for rubber with the specific criteria used. For example, the criteria weighing shows the real process for the decision making in which, every factor to be considered has a different importance level (Asgarzadeh et al., 2014). Also, it allows the incorporation of important bibliographic information and accepted the participation of specialists in the different areas involved, according to Li Y., Y., Wang, X. R., and Huang, C. L. (2011) this is essential when the scientific literature is incomplete. The characteristics mentioned above, allowed to assess the alternatives with a qualification that reflects its suitability degree for this task. Finally, due to the mathematical support behind the MCE process, the level degree of subjectivity is reduced during the comparison process of criteria and sub-criteria involved (Osorio & Orejuela 2008).

Regarding the criteria implied in the variable selection, the opinion of the respondents pointed out that, for the conditions presented in Oaxaca, the most important ones are those of climatic type. The weights of each variable assigned through the hierarchical analysis process, are summarized in the Table 2.

For the experts in rubber cultivation, the most important criterion was the climate with a set of weights average of 0.24 for precipitation, followed by temperatures; from them, the medium temperature has the highest value (0.22); however, the other criteria, although showed low weights, are particularly

Derivado del procesamiento anterior se calculó, además, el índice de consistencia para determinar la solidez de las comparaciones realizadas por los participantes. A partir del resultado de dicho índice para cada cuestionario, solo se consideraron aquellos cuyo resultado fuera igual o menor a 0.10 (Saaty, 2001). Finalmente, para obtener el peso definitivo de los criterios y subcriterios; fue empleada la media aritmética con los valores provenientes de la totalidad de los cuestionarios.

Aplicación de la Evaluación Multicriterio (EMC)

Las coberturas ponderadas se construyeron con base en la metodología propuesta por Cruz B., G. M., y Sotelo R., D. E. (2013), por lo que se obtuvieron los mapas de zonificación, los cuales son el resultado de operaciones booleanas entre los factores y cada uno de sus pesos.

Los mapas generados se reclasifican con las siguientes categorías: la aptitud más alta con un potencial por encima de 80 %, con valor 3; el potencial medio de entre 70-80 % con valor 2; y el bajo potencial correspondiente a 50-60 %, con valor de 1. Las áreas con valores inferiores a 50 % se omiten. Finalmente, el potencial se limita, únicamente, al clima trópico húmedo y se excluyen las áreas inapropiadas para el cultivo de hule, las áreas que se descartaron fueron: cuerpos de agua, áreas naturales protegidas, bosques, selvas y zonas urbanas.

Resultados y discusión

La incorporación de la Evaluación Multicriterio (EMC) en la toma de decisiones aportó diferentes ventajas sobre otras metodologías para la determinación de áreas potenciales para el hule con los criterios específicos empleados. Por ejemplo, la ponderación de los criterios refleja el proceso real de toma de decisiones en el que cada factor a considerar tiene un grado de importancia diferente (Asgarzadeh et al., 2014). Además, permitió la incorporación de información bibliográfica importante y admitió la participación de especialistas en las diferentes áreas involucradas, de acuerdo con Li Y., Y., Wang, X. R., y Huang, C. L. (2011) es esencial cuando la literatura científica es incompleta. Las características anteriores permitieron evaluar las alternativas con una calificación que refleja su grado de aptitud para la tarea en cuestión. Por último, debido al soporte matemático que hay detrás del proceso EMC, se reduce el grado de subjetividad durante el proceso de comparación de los criterios y subcriterios involucrados (Osorio & Orejuela 2008).

Table 2. Final weights for each variable.
Cuadro 2. Pesos finales para cada variable.

Variables	Weight / Peso
Precipitation / Precipitación	0.24432
Medium temperature / Temperatura media	0.22378
Maximum temperature / Temperatura máxima	0.21690
Minimum temperature / Temperatura mínima	0.19740
Slope / Pendiente	0.04479
Altitude / Altitud	0.03277
Edaphology / Edafología	0.02133
Texture / Textura	0.01871

important for the process because, if some of them is not fulfilled, repercussions in the establishment of this cultivation could be severe.

In Oaxaca, the most important region is in Papaloapan, this consists of the districts of Tlaxiaco with 14 municipalities and six of Choapan. In nine of them, the rubber use is carried out: Santiago Jocotepec and Santiago Llaveo, in the district of Choapan; San Juan Bautista Tuxtepec, San José Chiltepec, San Juan Bautista Valle Nacional, San Lucas Ojitlán, Loma Bonita, Santa María Jacatepec and Acatlán de Pérez Figueroa, in the district of Tuxtepec (Martínez, Rojo, & Jasso, 2007). The municipality of San Juan Bautista Tuxtepec highlights with 48.5 % of producers; followed by San José Chiltepec, Santa María Jacatepec and San Juan Bautista Valle Nacional, which together have the 38.4 % of producers (SNIDRUS, 2011), this is in line with the results obtained in this study (Figure 3).

The territory per suitability levels for rubber plantations in the state of Oaxaca can be seen in the Table 3. The total surface of the areas with optimum potential is in the municipalities of Matías Romero Avendaño, with 24 267 ha; San Juan Lana, with 22 066 ha; and San Juan Bautista Tuxtepec, with 16 991 ha; followed by Santiago Jocotepec with 13 069 ha and Santiago Yaveo, with 11 106 ha, (Table 4).

At the second level, with a medium suitability, the municipalities with larger surface are San Juan Mazatlán, with 85 663 ha; Santa María Chimalapa, with 59 628 ha; Santiago Cotzocón, with 38 181 ha; and San Juan Guichicovi, with 37 965 ha. The low potential is the least represented. However, it is not excluded the possibility of plantations prospering in the municipalities belonging to this level, whose interval goes from 50 to 60 %. The municipality with a larger surface within this category is San Juan Mazatlán, with 40 403

Respecto a los criterios implicados en la selección de variables, la opinión de los encuestados señaló que, para las condiciones de Oaxaca, los de tipo climático son los más importantes. En el Cuadro 2 se resumen los pesos de cada variable asignados mediante el proceso de análisis jerarquizado.

Para los expertos en el cultivo del hule, el criterio más importante fue el clima con un promedio de pesos ponderados de 0.24 en precipitación, seguido por las temperaturas; de ellas, a la temperatura media le corresponde el valor más alto (0.22); sin embargo, el resto de los criterios, aunque presentaron pesos bajos, se consideran de especial importancia en el proceso, debido a que, si no se cumple con alguno de ellos, las repercusiones en el establecimiento del cultivo podrían ser drásticas.

En Oaxaca, la región más importante está en el Papaloapan, la cual está integrada por los distritos de Tuxtepec con 14 municipios y de Choapan, seis. En nueve de ellos, se lleva a cabo el aprovechamiento del hule: Santiago Jocotepec y Santiago Llaveo, en el distrito de Choapan; San Juan Bautista Tuxtepec, San José Chiltepec, San Juan Bautista Valle Nacional, San Lucas Ojitlán, Loma Bonita, Santa María Jacatepec y Acatlán de Pérez Figueroa, en el distrito de Tuxtepec (Martínez, Rojo, & Jasso, 2007). Destaca el municipio de San Juan Bautista Tuxtepec con 48.5 % de los productores; seguido en importancia por San José Chiltepec, Santa María Jacatepec y San Juan Bautista Valle Nacional, que en conjunto concentran a 38.4 % de los productores (SNIDRUS, 2011), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este estudio (Figura 3).

La extensión por niveles de aptitud para plantaciones de hule en el estado de Oaxaca se observa en el Cuadro 3. La superficie total de zonas con potencial óptimo se concentra en los municipios Matías Romero

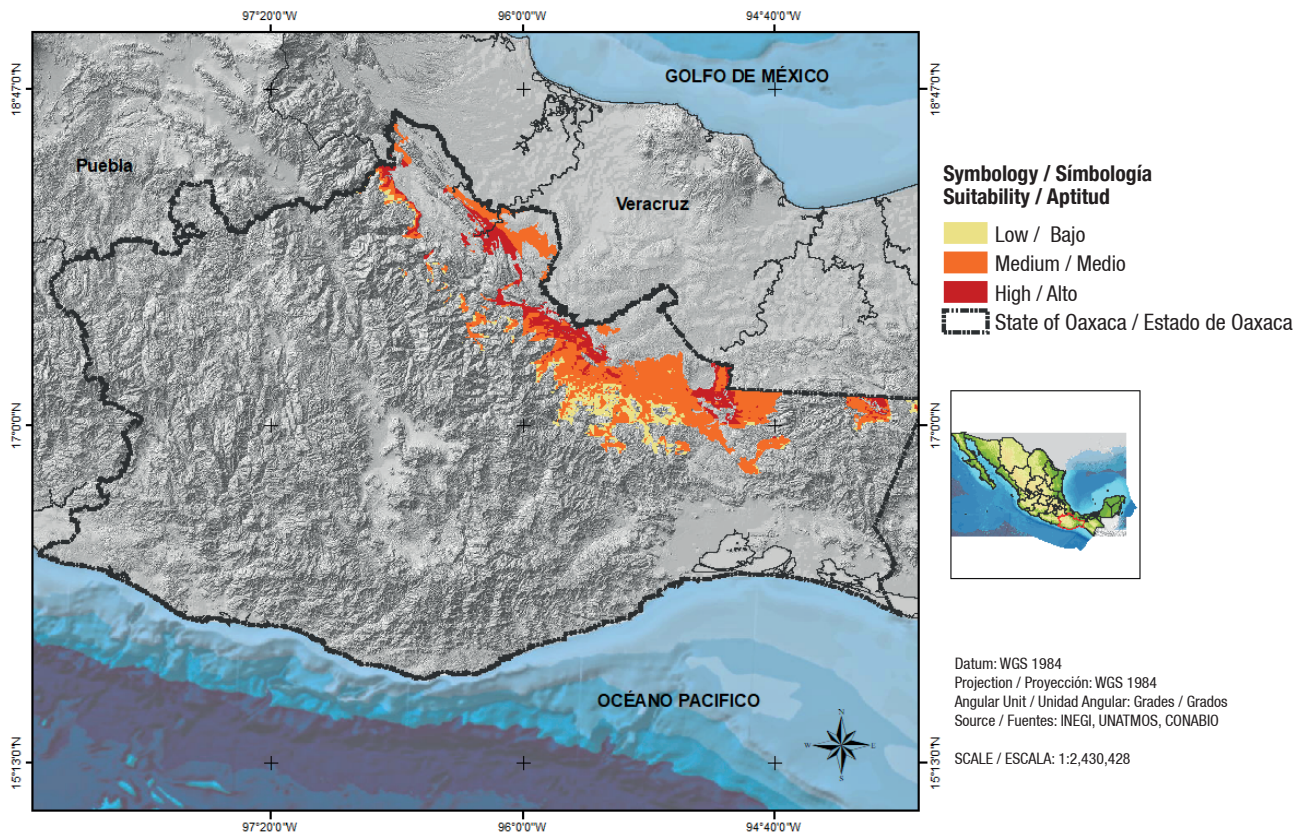


Figure 3. Potential zoning for the *Hevea brasiliensis* growing in Oaxaca.
Figura 3. Zonificación potencial para el cultivo de *Hevea brasiliensis* en Oaxaca.

Table 3. Total surface per suitability for rubber plantations in Oaxaca.
Cuadro 3. Superficie total por aptitud para plantaciones de hule en Oaxaca.

Suitability level / Nivel de aptitud	Hectares / Hectáreas
High / Alto	141 790.81
Medium / Medio	438 811.47
Low / Bajo	105 045.66

ha; followed by San Juan Cotzocón (17 161 ha) and San Juan Guichicovi (6 329 ha) (Table 4).

In Oaxaca, the predominance of potential areas at medium level to establish rubber plantations, matches with what is quoted by Díaz J. J., et al., (2013); although the values documented here are higher.

In 2015, it was estimated the existence of 3 978.50 ha planted with *H. brasiliensis* in the state of Oaxaca: where, the municipality with the largest planted area was San Juan Bautista Tuxtepec (960 ha), followed by San José Chiltepec (581 ha) and in third position, San Juan Bautista Valle Nacional (473 ha) (SIAP, 2020). During

Avendaño, con 24 267 ha; San Juan Lana, con 22 066 ha; y San Juan Bautista Tuxtepec, con 16 991 ha; seguidos por Santiago Jocotepec con 13 069 ha y Santiago Yaveo, con 11 106 ha, (Cuadro 4).

En el segundo nivel, con aptitud media, los municipios con mayor superficie son San Juan Mazatlán, con 85 663 ha; Santa María Chimalapa, con 59 628 ha; Santiago Cotzocón, con 38 181 ha; y San Juan Guichicovi, con 37 965 ha. El potencial bajo es el menos representado; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que prosperen plantaciones en los municipios pertenecientes a este nivel, cuyo intervalo varía de 50 a 60 %. El municipio con más superficie dentro de

Table 4. Total surface with terrain suitability in the municipalities of Oaxaca.
Cuadro 4. Superficie total de aptitud de terreno en los municipios de Oaxaca.

Municipality / Municipio	High (ha) / Alta (ha)	Medium (ha) / Media (ha)	Low (ha) / Baja (ha)
Acatlán de Pérez Figueroa	2 179.15	5 425.39	0.0
Asunción Ixtaltepec	0.0	1 787.58	0.0
Ayotzintepec	1 832.58	492.78	0.0
Cintalapa	4.08	0.00	0.64
Cosolapa	0.0	1 520.92	0.0
El Barrio de La Soledad	0.0	947.84	0.0
Eloxochitlán de Flores Magón	0.0	122.18	29.31
Guevea de Humboldt	0.0	193.71	1 280.70
Ixtlán de Juárez	485.53	5 111.38	1 021.78
Jesús Carranza	6.36	45.61	0.0
Loma Bonita	0.0	17 441.98	0.0
Matías Romero Avendaño	24 267.12	44 211.74	156.36
Otatitlán	0.0	0.22	0.0
Playa Vicente	2.63	5.82	0.0
San Andrés Teotilalpam	0.0	220.34	0.0
San Felipe Jalapa de Díaz	1 914.56	993.43	207.58
San Felipe Usila	834.40	1 478.60	1 075.73
San José Chiltepec	7 658.37	434.07	0.0
San José Independencia	1 125.89	351.89	0.0
San José Tenango	302.56	4 098.35	3 519.81
San Juan Bautista Tuxtepec	16 991.71	25 134.88	0.0
San Juan Bautista Valle Nacional	0.0	1 535.08	892.65
San Juan Comaltepec	35.88	2 386.22	1 452.06
San Juan Cotzocon	4 937.83	38 181.09	17 161.07
San Juan Guichicovi	3 442.70	37 965.30	6 329.45
San Juan Guichicovi	714.99	982.60	0.0
San Juan Lalana	22 066.03	19 858.42	644.21
San Juan Mazatlán	1 499.20	85 663.63	40 403.94
San Juan Petlapa	176.10	4 589.95	1 472.09
San Juan Yaee	0.0	667.39	0.02
San Lucas Camotlán	0.0	930.24	569.26
San Lucas Ojitlán	4 418.50	1 273.58	
San Miguel Chimalapa	0.0	1 360.13	297.66
San Miguel Quetzaltepec	0.0	778.54	2 219.47
San Miguel Soyaltepec	768.57	4,546.72	0.0

Table 4. Total surface with terrain suitability in the municipalities of Oaxaca. (cont.)
Cuadro 4. Superficie total de aptitud de terreno en los municipios de Oaxaca. (cont.)

Municipality / Municipio	High (ha) / Alta (ha)	Medium (ha) / Media (ha)	Low (ha) / Baja (ha)
San Pedro Ixcatlán	956.94	869.39	255.27
San Pedro Sochiapam	0.0	225.15	257.76
San Pedro Teutila	781.08	2 217.58	377.26
San Pedro Yolox	0.0	537.01	121.39
San Sebastián Tlacotepec	3.22	16.88	1.11
Santa María Alotepec	0.0	280.46	444.57
Santa María Chilchotla	4 831.97	4 874.51	913.17
Santa María Chimalapa	10 118.81	59 628.65	8 544.35
Santa María Guienagati	0.0	172.06	1 905.64
Santa María Jacatepec	2 763.12	232.83	0.0
Santa María Petapa	0.0	5 368.29	504.72
Santiago Camotlán	636.47	4 249.11	2 055.18
Santiago Choapam	1 851.48	6 712.84	1 584.64
Santiago Comaltepec	0.0	2 295.95	561.90
Santiago Ixcuintepec	0.0	4 354.46	2 002.14
Santiago Jocotepec	13 069.92	8 051.55	191.67
Santiago Lachiguiri	0.0	1 838.34	758.75
Santiago Lalopa	0.0	175.03	81.30
Santiago Sochiapan	0.0	1.46	0.0
Santiago Yaveo	11 106.05	20 945.59	1 066.98
Santiago Zacatepec	0.0	349.36	566.47
Santo Domingo Petapa	0.0	3 114.76	3288.31
Santo Domingo Tehuantepec	0.0	1 409.68	140.29
Tezonapa	7.02	5.01	0.0
Totontepec Villa de Morelos	0.0	0.63	454.61
Villa Talea de Castro	0.0	147.26	234.41
Total	141 790.81	438 811.47	105 045.66

subsequent field tours, 30 rubber plantations were geo-referenced in the municipalities of San Juan Bautista Tuxtepec and San José Chiltepec (Figure 4), this, in order to validate the estimations of potential areas.

In general, for the states of Veracruz, Oaxaca, Chiapas and Tabasco, about 1 969 884 ha with potential to grow rubber, were calculated, however, the largest planted area in 2016, was 29 034.18 ha in these four states and, for 2019, it was of 28 112.10 (SIAP, 2020). This is, there is a great surface that can be used to implement plantations, because it satisfies soil and weather

esta categoría es San Juan Mazatlán, con 40 403 ha; le siguen en importancia San Juan Cotzocón (17 161 ha) y San Juan Guichicovi (6 329 ha) (Cuadro 4).

En Oaxaca, la predominancia de zonas potenciales con nivel medio para el establecimiento de plantaciones de hule coincide con lo citado por Díaz J. J., et al., (2013); aunque los valores que aquí se documentan son más altos.

En el año 2015 se estimaba la existencia de 3 978.50 ha plantadas con *H. brasiliensis* en el estado de Oaxaca;

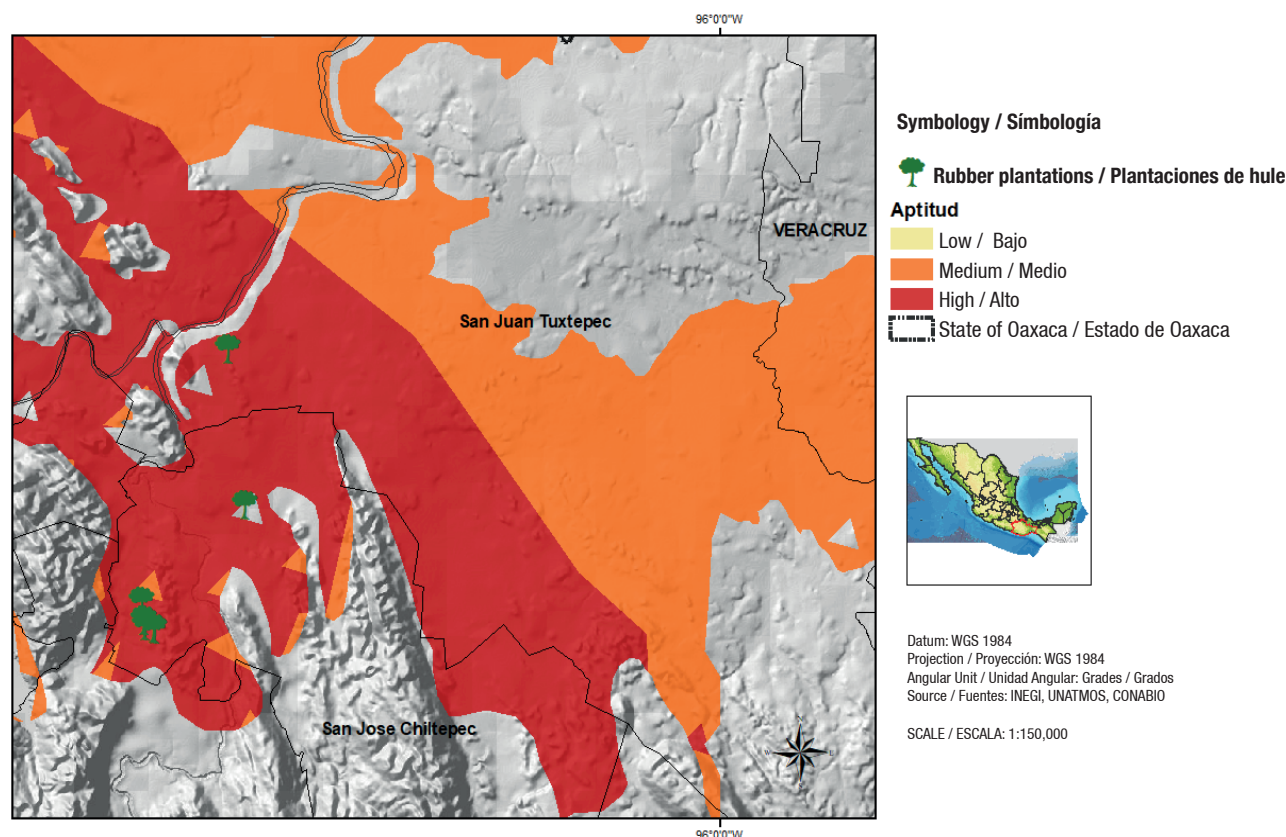


Figure 4. Rubber plantations located within the suitable areas.
Figura 4. Plantaciones de hule ubicadas dentro de áreas de aptitud.

requirements to optimally develop and produce *H. brasiliensis*. In this way, some municipalities that currently do not figure as producers, can be integrated into the cultivation, and in this way, contribute to increase production.

Among the studies about rubber cultivation in Mexico, those of Ortiz (2011) and Rueda S. A., Sáenz R., J. T., Muñoz F., H. H., Ramírez O., G., & Molina C., A., (2016) highlight, these characterize the establishment and development of rubber plantations. Aguirre and Santoyo (2013) implemented a diagnosis of the rubber situation at global and national level, and about the dynamics in plantation innovation; they also make a proposal to manage the crop. Nowadays, plantations have spread to areas with tropical rain forests of Jalisco and Nayarit (Rueda et al., 2016), this has been possible with the spatial analysis of the land suitability, as presented in this study. In this regard, there are few studies focused on the land suitability for commercial forest plantations, the studies about tropical species with timber purposes, highlights (Bustillos-Herrera et al., 2007; Delgado et al., 2010).

donde, el municipio con mayor superficie plantada era San Juan Bautista Tuxtepec (960 ha), seguido por San José Chiltepec (581 ha) y en tercera posición, San Juan Bautista Valle Nacional (473 ha) (SIAP, 2020). Durante recorridos posteriores en campo se georreferenciaron 30 plantaciones de hule en los municipios de San Juan Bautista Tuxtepec y San José Chiltepec (Figura 4), esto con el fin de validar las estimaciones de las áreas potenciales.

En general, para los estados de Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Tabasco se estiman alrededor de 1 969 884 ha con potencial para el cultivo del hule, no obstante, la superficie mayor plantada en el 2016, en estos cuatro estados, fue de 29 034.18 ha y para el 2019 fue de 28 112.10 en 2016 (SIAP, 2020). Es decir, existe una gran superficie susceptible de aprovecharse para implementar plantaciones, ya que satisfacen los requerimientos edafoclimáticos para el óptimo desarrollo y producción de *H. brasiliensis*. De tal manera que, algunos municipios que actualmente no figuran como productores se pueden incorporar al cultivo, y así, contribuir al incremento de la producción.

Finally, it is worth mentioning that the use of the Multi-Criteria Evaluation Method, together with the Geographic Information Systems, and in accordance with the rubber requirements, has a wide perspective to calculate the zones with a higher chance of success to grow rubber. However, the quality of the results depends largely on the cartographic information, the opinion of experts and ecological data of this specie, derived from the specialized literature review, of both, the place of origin of the taxon and the places where these plantations have been successful. In the same way, it must bear in mind that this method only considers the agroecological requirements, and it puts aside the economic and social aspects that also influences the cultivation, for this, it is necessary to include them in subsequent analysis.

Conclusions

In Oaxaca, the cultivation of *Hevea brasiliensis* has an optimum potential to be grown in the municipalities of Matías Romero, Juan Lana, San Juan Bautista Tuxtepec, Santiago Jocotepec and Santiago Yaveo. It is expected that the methodology used serves as a basis for similar applications with other species.

Acknowledgments

The Programa de Fomento a la Agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) is thanked for financing the development of this study, that is part of the project “Actualización y transferencia de un paquete tecnológico para el cultivo del hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el trópico húmedo mexicano”. Authors thank and recognize the three anonymous reviewers for their valuable commentaries and suggestions to substantially improve this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Asgarzadeh, M., Vahdati, K., Lotfi, M., Arab, M., Babaei, A.,..., Rouhani, G. (2014). Plant selection method for urban landscapes of semi-arid cities (a case study of Tehran). *Urban Forestry & Urban Greening*, 13: 450-458. Doi: 10.1016/j.ufug.2014.04.006
- Aguirre R., C. E., & Santoyo C., V. H. (2013). *El cultivo del árbol del hule (Hevea brasiliensis Muell. Arg.): avances y retos en la gestión de la innovación*. Primera edición. Colección Trópico Húmedo. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México, México. 133 pp.

Entre las investigaciones del cultivo del hule en México sobresalen el de Ortiz (2011) y Rueda S. A., Sáenz R., J. T., Muñoz F., H. H., Ramírez O., G., & Molina C., A., (2016), quienes caracterizan el establecimiento y desarrollo de plantaciones de hule. Aguirre y Santoyo (2013) desarrollaron un diagnóstico de la situación del hule a nivel mundial y nacional, así como de la dinámica en la innovación de plantaciones; además hacen una propuesta para el manejo del cultivo. En la actualidad, las plantaciones se han extendido a las zonas con bosques tropicales húmedos de Jalisco y Nayarit (Rueda et al., 2016), lo cual se ha logrado mediante el análisis espacial de la aptitud del terreno, tal y como se presenta en este estudio. Al respecto, son pocos los trabajos enfocados a la aptitud de la tierra para plantaciones forestales comerciales destacan principalmente estudios de especies tropicales con fines maderables (Bustillos-Herrera et al., 2007; Delgado et al., 2010).

Por último, cabe mencionar que el empleo del Método de Evaluación Multicriterio en conjunto con Sistemas de Información Geográfica, y en función de los requerimientos de hule tiene una perspectiva amplia para estimar las zonas con mayor probabilidad de éxito para el cultivo del hule. No obstante, la calidad de los resultados depende, en gran medida, de la información cartográfica, la opinión de expertos y de los datos ecológicos de la especie, derivados de la revisión de literatura especializada, tanto del lugar de origen del taxón como de los sitios en donde han sido exitosas las plantaciones. De igual manera, se debe tener en cuenta que este método solo toma en cuenta los requerimientos agroecológicos y deja a un lado los aspectos sociales y económicos, que también influyen en el cultivo, por lo que es necesario incluirlos en análisis posteriores.

Conclusiones

En Oaxaca, el cultivo de *Hevea brasiliensis* tiene potencial óptimo para su cultivo en los municipios de Matías Romero, Juan Lana, San Juan Bautista Tuxtepec, Santiago Jocotepec y Santiago Yaveo. Se espera que la metodología empleada sirva de base para aplicaciones similares con otras especies.

Agradecimientos

Se agradece al Programa de Fomento a la Agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) por el financiamiento para el desarrollo del presente trabajo que formó parte del proyecto “Actualización y transferencia de un paquete tecnológico para el cultivo del hule

- Bravo-Bello, J. C., Martínez-Trinidad, T., Romero-Sanchez, M. E., Valdez-Lazalde, J. R., & Benavides-Meza, H. (2020). The analytic hierarchy process for selection of suitable trees for Mexico City. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13 (6), 541-547. doi: 10.3832/for3481-013
- Brunelli, M. (2015). *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. SpringerBriefs in Operations Research. Aalto University, Helsinki, Finland. 83 pp.
- Bustillos-Herrera J. A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete A., & González-Guillén. M. (2007). Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. *Agrociencia*, 41(7), 787-796.
- Ceballos S., A., & López B. J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using multi-criteria evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central México. *Agriculture Systems*, (77), 117-136. doi:10.1016/S0308-521X(02)00103-8
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2016). *Principales especies no maderables establecidas en plantaciones forestales comerciales por entidad federativa en el periodo 2000-2014*. Paquete Técnico, CONAFOR. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/930Hevea%20brasiliensis.pdf>
- Cruz B., G. M., & Sotelo R., D. E. (2013). Coupling Spatial Multi attribute Analysis and Optimization to Identify Reforestation Priority Areas. *Mountain Research and Development*, 33(1): 29-39. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00085.1
- De Dios C. O., Leshner G., J. M., Álvarez M. I., Molina M., R. F., & Jiménez G. F. (2015). La importancia de la detección de la variación somaclonal en el árbol del hule. *Kuxulkab'*, 21 (40), 5-10. doi:10.19136/kuxulkab.a21n40.989
- Delgado C., C. E., Valdez L., J. R., Fierros G., A. M., de los Santos P., H. M., & Gómez G., A. (2010). Aptitud de áreas para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz: proceso de análisis jerarquizado vs. álgebra booleana. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 123-133. doi: 10.29298/rmcf.v1i1.660
- Díaz J. J., Aguirre R. C., & Rendón M. R. (2013). Estimación de cosecha del hule. En A. J. Aguilar Á. J y V. H. Santoyo C., Estimación de rendimientos en el sector agropecuario. Universidad Autónoma Chapingo-CIESTAAM-Porrúa. Chapingo, México. 206 pp.
- Díaz P., G., Guajardo P., R. A., Medina G., G., Sánchez C., I., Soria R., J.,..., Ruíz C., J. A. (2012). *Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México*. Publicación especial número 8. Centro de Investigación Regional Golfo Centro, INIFAP. Cotaxtla, Veracruz. 139 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). (1978). *Report on the agroecological Zones Project*. Methodology and Results for Africa. World Soil Resources Report 40. FAO. Rome, Italy. 127 pp.
- Fernández E., A., Romero C., R., & Zavala H., J. (2012). Atlas Climático de México y Áreas Adyacentes. Volumen 1. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de <http://atlasclimatico.unam.mx/ACM/#24>
- Flores A., E., & Moreno S., F. (1994). Potencial productivo para el establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus radiata* en el Estado de México. En B. Arteaga, M. A. Musálem. (Eds.). Memoria de la IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. 19 al 21 de julio. México, D. F., México. pp. 143-150.
- Hernández S., J. R., Bollo M., M. Méndez L., A. P., Onagy D., E., Zorrilla R., M., & Ordaz, H. A. (2020). Aptitud sectorial para el desarrollo forestal: consideraciones en la ordenación general del territorio mexicano. *Cuadernos Geográficos*, 59(1), 32-53. doi:10.30827/cuadgeo.v59i1.8079
- Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & Martínez-Trinidad, T. (2019). Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25(2). DOI:10.21829/myb.2019.2521819
- García, E. - CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Gonçalves, P. de S., Ortolani, A., & Cardoso, M. (1997). *Melhoramento genético da seringueira: uma revisão*. Documentos IAC 54. Campinas-SP, Brazil. 55 p.
- García N. H., García R., D. R., Moreno S., R., López B., J., & Villers R., M. L. (2001). Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras. *Agricultura Técnica en México*, 27(2): 107-118.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2015a). Conjunto de datos vectoriales. Obtenido de Uso del suelo y Vegetación, escala 1:250000. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2015b). *Guía para la interpretación de Cartografía Edafológica*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2008). Conjunto de datos Vectoriales. Obtenido de Unidades Climáticas escala 1:1000000. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Modelo Digital de Elevación, Escala 1:50000.

Fin de la versión en español

- Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/metadatos/ntm.aspx?s=geo&c=2374>
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). Edafología. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Kerche-Silva, L. E., Cavalcante, Dalita, G. S. M., & Job, A. E. (2017). Natural Rubber Latex Biomaterials in Bone Regenerative Medicine. Biomaterials in Regenerative Medicine. IntechOpen Book Series. doi: 10.5772/intechopen.69855.
- Li Y. Y., Wang, X. R., & Huang, C. L. (2011). Key street tree species selection in urban areas. *African Journal of Agricultural Research*, 6(15): 3539-3550. doi: 10.5897/AJAR11.461
- López-Upton, J., Valdez-Lazalde, J. R., Ventura-Ríos, A., Vargas-Hernández, J. J., & Guerra-de-la-Cruz, V. (2015). Extinction Risk of *Pseudotsuga Menziesii* Populations in the Central Region of Mexico: An AHP Analysis. *Forests*, 6(5): 1598-1612. doi: 10.3390/f6051598
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley. Inc. Ontario, Canadá. 392 pp.
- Martínez R. R., Rojo M., G., & Jasso M., J. (2007). Análisis del crecimiento y producción de látex en plantaciones forestales comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Ra Ximhai*, 3(2): 565-578.
- Moctezuma L., G. (2019). Evaluación financiera y de potencial productivo del paquete tecnológico para el establecimiento de *Hevea brasiliensis* (willd. ex A. Juss) Müell. Arg. en Tabasco. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 44:128-137.
- Olivas G., U. E., Valdez L., J. R., Aldrete A., González G., M. de J., & Vera, G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: Definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4): 411-419.
- Ortiz, H. E. (2011). *Paquete Tecnológico del Hule (Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). Veracruz, México. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. 22 pp. Recuperado de http://www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/paquetes/hule_establecimiento.pdf
- Osorio G., J. C., & Orejuela C. J. P. (2008). Analytic hierarchic process and multicriteria decision making. Application example. *Scientia et Technica*, 14(39): 247-252.
- Pham, M., Vu, D., Shah, S., Nguyen, Q., Nguyen, T.,..., Nguyen, V. (2021). Evaluation of land suitability for *Cunninghamia konishii* Hayata (Cupressaceae) planting in Vietnam. *Geography, Environment, Sustainability*, 14(2):63-73. Doi: 10.24057/2071-9388-2020-218
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M., Franco-Plata, R., Antonio-Némiga, X., & Manzano-Solis, L. R. (2012). Determination of optimal zones for forest plantations in the State of Mexico using multi-criteria spatial analysis and GIS. *Journal of Geographic Information System*, 4(3): 204-218. doi: 10.4236/jgis.2012.43025
- Ray, D., Behera, M. D., & Jacob, J. (2018). Evaluating Ecological Niche Models: A Comparison Between Maxent and GARP for Predicting Distribution of *Hevea brasiliensis* in India. *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B Biol. Sci.* 88, 1337-1343. Doi:10.1007/s40011-017-0869-5
- Rojo M., G. E., Martínez R., R., & Jasso M., J. (2011). *El cultivo del hule en México*. (Primera ed.). Universidad Autónoma Indígena de México. El Fuerte, Sinaloa, México. 334 pp.
- Rueda S. A., Sáenz R., J. T., Muñoz F., H. H., Ramírez O., G., & Molina C., A. (2016). *Guía técnica para el establecimiento y manejo de plantaciones del cultivo del hule (Hevea brasiliensis) en Jalisco y Nayarit*. Folleto Técnico Núm. 2. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, SAGARPA-INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 67 pp.
- Sanchez, P. A., Palma, Ch. A., & Buolb, S. W. (2003). Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114 (3): 157-185. doi:10.1016/S0016-7061(03)00040-5
- Saaty, T. L. (2001). The Analytic Network Process. En T. L. Saaty and L. G. Vargas (Eds.). *Decision Making with the Analytic Network Process*. Springer US. New York, NY, USA. pp. 1-26.
- Santé R. I., & Crecente M. R. (2005). Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales. *Geofocus*, 5: 40-68.
- Shultes R. E., & Raffauf, R. F. (2009). La selva sanadora: plantas medicinales y tóxicas del noreste del Amazonas. *Revistas de Estudios Sociales*, 32: 126-142.
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria). (2020). Anuario Estadístico de la producción Agrícola. Obtenido de Cierre de la producción agrícola por estado. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/icultivo/
- SNIDRUS (Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable). (2011). El cultivo del Hule. Datos Básicos 2011. Oaxaca: Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable de Oaxaca. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92646/Cuadros_tabulares_2011.compressed.pdf
- UNIATMOS (Unidad de Información para las Ciencias Atmosférica y Ambientales). (2019). Atlas Climático Digital de México. Recuperado de <http://atlasclimatico.unam.mx/RUOA/servmapas>
- Van Ranst E., Tang H., Groennemans R., & Sinthurath S. (1996). Application of Fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. *Geoderma*, 70(1): 1-19.
- Wright, L. E., Zitzmann, W., Young, K., & Googins, R. (1983). LESA—agricultural land evaluation and site assessment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38 (2): 82-86.