

Potential areas for jalapeño pepper production in Quintana Roo, México

Claudia Tania Lomas-Barrié¹

Emiliano Loeza-Kuk^{1*}

Rubén Darío Góngora-Pérez²

Abstract

The sustainability of agricultural systems depends on territorial planning based on the suitability of the target crop (Land Suitability Analysis, LSA). In Quintana Roo, Mexico, commercial rainfed production of jalapeño pepper (*Capsicum annum* L.) has decline over the past decade, even though the region offers favorable agroclimatic conditions for production during periods of lower competition in the national market. The objective of this study was to identify areas with the highest ecological suitability for sustainable production, using a methodology that integrates landscape units as a cartographic base and multicriteria evaluation (MCE) as a decision-making tool. Soil and climatic variables were considered within ecological framework. The results show that 19.0 % of the state's territory is suitable for cultivation without compromising natural vegetation through land-use change. The maps indicate levels of suitability and sensitivity for landscape units at a 1:20000 scale, providing valuable information for local agricultural territorial planning.

Keywords: Landscape units, land-use-planning, *Capsicum annum* L., land suitability analysis (LSA).

Zonas potenciales para la producción de chile Jalapeño en Quintana Roo, México

Resumen

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende de la planificación territorial basada en la idoneidad del cultivo objetivo (Land Suitability Analysis, LSA). En Quintana Roo, México, la producción comercial en temporal de chile jalapeño (*Capsicum annum* L.) ha disminuido en la última década, a pesar de que el territorio tiene condiciones agroclimáticas favorables para producir durante ventanas de menor competencia en el mercado nacional. El objetivo de este estudio fue identificar las áreas con mayor aptitud ecológica para la producción sostenible del cultivo, mediante una metodología que integra como base cartográfica las unidades de paisaje y la evaluación multicriterio (EMC) como herramienta de decisión. Se consideraron variables edáficas y climáticas bajo un enfoque ecológico. Los resultados muestran que el 19.0 % del territorio estatal es apto para el cultivo, sin comprometer áreas de vegetación natural por cambio de uso del suelo. La cartografía indica niveles de aptitud y de sensibilidad de las unidades de paisaje escala 1:20000, aportando elementos para la planificación territorial agrícola local.

Palabras clave: Unidades de paisaje, ordenación de tierras, *Capsicum annum* L., análisis de la idoneidad de los cultivos (LSA).

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, CIRSE-C.E. Mochochá, Yucatán, carretera Mérida-Motul km 25.5 Mochochá, Yucatán, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRSE-C.E. Quintana Roo, Carretera Chetumal-Bacalar km 24, Xul-Ha, Othon P. Blanco, Quintana Roo, México.

*Corresponding author: loeza.emiliano@inifap.gob.mx Tel: 0180008822 Ext. 88232, ORCID ID: 0000-0002-1435-7516

Introduction

Unplanned establishment of cultivation areas results in wasted resources, lower profits for producers, and degradation of natural vegetation. In Quintana Roo, Mexico, jalapeño pepper was the primary rainfed vegetable crop for more than 40 years (García & Nava, 2010; Tuz, 2015). In 2006, production reached 28 000 tons (t) across 2 498.5 hectares (ha). However, starting in 2013, production began to decline, and by 2019 the reported cultivation area had decreased to 105 ha (Tuz, 2015; CESAVEROO, 2019; SIAP, 2024).

The causes of this decline are likely multifactorial (Keys & Roy-Chowdhury, 2006), including phytosanitary constraints such as *Bemisia tabaci* Gennadius and the *Phytophthora capsici* Leo complex (Díaz-Plaza et al., 1996, Robles-Hernández et al., 2010, Loeza-Kuk et al., 2014, Castro-Rocha et al., 2012). Environmental constraints such as losses from droughts and hurricane-induced flooding have also contributed (Schnaid-Cámara, 2017, Gurri-García & Vallejo-Nieto, 2007). In addition, economic limitations, including intermediaries in the supply chain (Keys & Roy-Chowdhury, 2006) and technological disparities (García & Nava, 2010) have resulted in unprofitable production (Ayala et al., 2008; Ortega, 2020).

Despite the factors mentioned, the region offers a favorable climatic period for producing fresh jalapeño peppers outside the traditional rainfed season. Unlike other regions of the country, growth and flowering are not hampered by temperatures below 15 °C (Bakker & Van-Uffelen, 1988; García & Nava, 2010; Gaspar-Moctezuma, 2019). This highlights the need to identify the most suitable areas for cultivating jalapeño peppers in Quintana Roo.

Geographic approaches for evaluating the productive potential of a territory are generally grouped into two main categories (Plantinga, 2015; Vasu et al 2018; Mugiyo et al 2021). The first is the biophysical and pedological approach, which identifies the constraints and suitability of the land for specific agricultural uses and has been applied by Medina-García et al. (1997); Díaz-Padilla et al. (2012); Ruiz et al. (2013); Medina-García et al. (2016). The second category corresponds to spatial-socioeconomic approaches, which integrate crop requirements, management practices and human factors. This approach provides the methodological basis for this study.

Introducción

El establecimiento de zonas de cultivo sin planeación conlleva al desperdicio de recursos y pérdidas en las ganancias de los productores, así como el deterioro de la vegetación natural. En Quintana Roo, México, por más de 40 años el chile jalapeño fue la principal hortaliza cultivada en régimen de temporal (García & Nava, 2010; Tuz, 2015), en 2006 se registraron 28 000 toneladas (t) en 2 498.5 hectáreas (ha). A partir del 2013 inició su declive y en 2019 la superficie reportada fue de 105 ha (Tuz, 2015; CESAVEROO, 2019; SIAP, 2024).

Las causas de dicha caída deben ser multifactoriales (Keys & Roy-Chowdhury, 2006), desde restricciones fitosanitarias como *Bemisia tabaci* Gennadius y el complejo *Phytophthora capsici* Leo (Díaz-Plaza et al., 1996, Robles-Hernández et al., 2010 y Loeza-Kuk et al., 2014, Castro-Rocha et al., 2012). Restricciones ambientales como pérdidas por sequía e inundaciones por huracanes (Schnaid-Cámara, 2017, Gurri-García & Vallejo-Nieto, 2007). Adicionalmente, enfrenta restricciones económicas como el intermediarismo (Keys & Roy-Chowdhury, 2006) y la desigualdad tecnológica (García & Nava, 2010) que provocan una producción no rentable (Ayala et al., 2008; Ortega, 2020).

A pesar de los factores enunciados, la región posee una ventana climática de oportunidad para el chile fresco fuera del temporal, a diferencia de otras regiones del país, no hay limitante de crecimiento y aborto de flores por temperaturas menores a 15 °C (Bakker & Van-Uffelen, 1988; García & Nava, 2010; Gaspar-Moctezuma, 2019), esto plantea la necesidad de delimitar las mejores áreas para cultivar chile jalapeño en Quintana Roo.

Los enfoques geográficos para evaluar el potencial productivo de un territorio se agrupan en dos ejes principales (Plantinga, 2015; Vasu et al 2018; Mugiyo et al 2021). El enfoque biofísico y pedológico que define las restricciones y la aptitud del territorio para un uso agrícola específico y han sido empleados por Medina-García et al. (1997); Díaz-Padilla et al. (2012); Ruiz et al. (2013); Medina-García et al. (2016). Mientras que el segundo eje corresponde a los enfoques espaciales-socioeconómicos. Éstos integran las necesidades del cultivo, las prácticas de manejo y los factores humanos; este enfoque constituye la base

In 1978, Ortiz-Solorio & Cuanalo de la Cerda delineated polygons known as land units through satellite-image photointerpretation. These units are areas that are homogeneous in their biophysical characteristics and land use, representing an operational level with a hierarchical degree of aggregation depending on the scale. According to Turner & Robbins (1989), Salinas (1997) and Mendoza & Bocco (1998), these areas are defined as geocological landscape units (LU), which integrate physical-environmental properties and current and potential anthropogenic uses at the ecological landscape scale.

Geographic Information Systems (GIS) streamline the photointerpretation of satellite imagery and can incorporate tools such as Multicriteria Evaluation (MCE) to explore alternatives involving multiple criteria and conflicting objectives (Barredo, 1996; Malczewski, 1999; Dang, 2024). This approach has been used to analyze the productive potential of maize, beans, sorghum, chickpea, wheat, alfalfa, grasses and maguey in Mexico (García-Nieto et al., 1999; Echavarría-Chávez & Medina-García, 2015; Sotelo-Ruiz et al., 2016).

The objective of this study was to develop a 1:20000 scale zoning analysis by integrating landscape units as the cartographic basis and Multicriteria Evaluation (MCE) to identify and characterize the regions with the highest productive potential for jalapeño pepper in Quintana Roo, Mexico.

Methodological Approach

To identify the potential zones for growing jalapeño pepper, the base cartography of the landscape units was generated. The SPOT 6 & 7 composite satellite image used was captured by the ERMEX antenna (2020) during the dry season (01/11/2017 - 30/04/2018), cloud-free and with near-vertical passes ($\pm 12^\circ$), at 1.5 m resolution and processing level 3A. The images were photo interpreted in the QGIS Girona v3 GIS software, using a minimum mappable area of 1cm². The initial interpretation was performed at a 1:250000, scale, from which LU in agricultural-use areas were selected and subsequently subdivided at a 1:20000 scale. Each land unit was then described based on its geometric and land-use patterns for classification.

To validate the agricultural landscape units identified *in silico*, the coordinates of jalapeño pepper,

metodológica del presente estudio.

Ortiz-Solorio & Cuanalo de la Cerda en 1978, delimitaron mediante fotointerpretación de imágenes de satélite, polígonos denominados unidades de tierra. Estas unidades son áreas homogéneas en sus características biofísicas y de uso, que constituyen un nivel operativo, con un nivel de agregación jerárquico dependiendo de la escala. Para Turner & Robbins (1989), Salinas (1997) y Mendoza & Bocco (1998) estas áreas las definen como unidades geocológicas de paisaje (UP), que integran propiedades físico-ambientales, así como usos antropogénicos actuales y potenciales, en la escala ecológica de paisaje.

Los sistemas de información geográfica (SIG) agilizan la fotointerpretación de imágenes de satélite, y pueden agregar herramientas como la Evaluación Multicriterio (EMC) en la búsqueda de alternativas para múltiples criterios y objetivos en conflicto (Barredo, 1996; Malczewski, 1999; Dang, 2024). Este enfoque ha sido utilizado para el análisis de potencial productivo de maíz, frijol, sorgo, garbanzo, trigo y alfalfa, pastos y maguey en México (García-Nieto et al., 1999; Echavarría-Chávez & Medina-García, 2015; Sotelo-Ruiz et al., 2016).

El objetivo de esta investigación fue realizar una zonificación escala 1:20000 integrando como base cartográfica las UP y la EMC para identificar y caracterizar las regiones con mayor potencial productivo para chile jalapeño en Quintana Roo, México.

Enfoque Metodológico

Para la identificación de las zonas potenciales del cultivo de chile jalapeño, se generó la cartografía base de las UP. La imagen del satélite compuesta SPOT 6 & 7 utilizada, fue capturada por la antenna ERMEX (2020) de la época seca (01/11/2017 - 30/04/2018), sin nubes y con pasos cercanos a la vertical ($\pm 12^\circ$), de 1.5 m y con nivel 3A de procesamiento. Las imágenes se fotointerpretaron en el SIG QGIS Girona v3, con el área mínima cartografiable de 1cm² primero a escala 1:250000, se seleccionaron las UP de áreas de uso agrícola, y se subdividieron a escala 1:20000. A cada UP se describieron sus patrones geométricos y de uso para su clasificación.

Para validar las UP agrícolas identificadas *in silico*, se sobrepusieron las coordenadas de las zonas de cultivo de chile jalapeño, chile habanero y otras hor-

habanero pepper, and other vegetable production areas from 2014 to 2019, recorded in the database of the Comité Estatal de Sanidad Vegetal of Quintana Roo, were overlaid.

Internal homogeneity and external heterogeneity with adjacent units were verified at 55 sites selected *a priori* with potential for cultivation or with a history of past cultivation, as well as at sites corresponding to landscape units with natural vegetation. At each selected unit, *in situ* variables were recorded, including land use, irrigation type, current crop, landscape fragmentation, soil fragility, and erosion risk, following a standardized form (supplementary material). To delineate LU boundaries, RGB images were captured with a UAV (Dji, Mavic2) during dry-season flights at an altitude of 100 meters. In addition, composite soil samples were collected according to standard protocol at a depth of 15 cm. Samples were dried, pulverized, homogenized at each site, and sent to the certified laboratory Fertilab to determine pH and soil texture using the Bouyoucos method.

To characterize thermal and rainfall conditions, data from 40 conventional weather stations with more than 30 years of records (1961 a 2024) were obtained from the CONAGUA database (2024). Additionally, climate polygon maps for the state were used from García-CONABIO (1998).

Similarly, the 1:250 000 (INIFAP-CONABIO, 2001), terrain slope data (INEGI, 2020), and vegetation map (INEGI, 2017) were compiled and geographically standardized.

Model integration

The theoretical agroecological requirements for the crop were defined according to García & Nava (2010) and Ruiz et al. (2013) (Table 1).

The potential natural instability (*En*) (Equation 1) was calculated for each landscape unit and soil type from the soil map (INIFAP & CONABIO, 2001), using the methodology adapted from Salinas (1997).

$$En = \frac{A+B+C+D}{TF}$$

TF = Total factors

A, B, C and D = factors used.

Factores:

talizas de 2014 al 2019 registradas en la base de datos del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Quintana Roo.

La homogeneidad interna y heterogeneidad externa con la unidad vecina, fue verificada en 55 sitios seleccionadas *a priori* con aptitud para el cultivo o donde históricamente se hubiese sembrado, así como sitios de UP de vegetación natural. En las unidades seleccionadas se registraron variables *in situ* como: uso de suelo, tipo de riego, cultivo presente, fragmentación del paisaje, fragilidad del suelo y riesgo por erosión, de acuerdo con un formulario (suplemento). Para la identificación de los límites de las UP se tomaron imágenes RGB con un VANT (Dji, Mavic2) en vuelos a 100 metros de altura en los meses secos. Adicionalmente, se colectaron muestras compuestas de suelo según el protocolo estándar a una profundidad de 15 cm, las muestras se secaron, pulverizaron, homogenizaron por sitio, y se enviaron al laboratorio certificado Fertilab para determinar pH y la textura por el método de Bouyoucos.

Para la caracterización de las condiciones térmicas y pluviales, se usaron las bases de datos de CONAGUA (2024) de 40 estaciones convencionales con más de 30 años de registros, del periodo 1961 a 2024. También se utilizó la cartografía de García-CONABIO (1998) para los polígonos de clima en el estado.

Así también se compiló y homologó geográficamente la carta edafológica 1:250 000 (INIFAP-CONABIO, 2001), la pendiente del terreno (INEGI, 2020) y la de vegetación del INEGI (2017).

Integración del modelo

Los requerimientos agroecológicos teóricos para el cultivo se definieron de acuerdo con García & Nava (2010) y Ruiz et al. (2013) (Cuadro 1).

La inestabilidad natural potencial (*En*) (Ecuación 1) se calculó para cada UP y tipo de suelo de la carta edafológica (INIFAP & CONABIO, 2001), con la metodología adaptada de Salinas (1997).

$$En = \frac{A+B+C+D}{TF}$$

TF = total de factores

A, B, C y D = factores utilizados.

Factores:

Table 1. Agroecological requirements of *Capsicum annum*.
Cuadro 1. Requerimientos agroecológicos de *Capsicum annum*.

Weight* / Peso*	Variable	Category / Categoría	Potential use**/ Uso potencial
7	Soil texture / Textura de suelo	Sandy-clay / Arenos- arcillosos	Suitable / Apto
		Silt / Limo	Unsuitable / No apto
6	Soil drainage / Drenaje de suelo	Good / Bueno	Suitable / Apto
		Prone to flooding /Inundable	Unsuitable / No apto
5	Soil salinity / Contenido de sales en el suelo	Low / Bajo	Suitable / Apto
		High / Alto	Unsuitable / No apto
4	Soil pH / pH del suelo	< 5.5	Unsuitable / No apto
		5.5 to 7.5	Suitable / Apto
		> 7.5	Unsuitable / No apto
3	Slope / Pendiente	0-5	Suitable / Apto
		5-10	Moderate / Mediano
		10-15	Low / Bajo
		> 15%	Unsuitable / No apto
2	Precipitation regime / Régimen de lluvias	Average / Intermedio	Suitable / Apto
		Summer / Verano	Moderate / Mediano
1	Minimum temperature / Temperatura mínima	Average <15 °C / Promedio <15 °C	Unsuitable / No apto

* Variable weight. **Suitability range: 10 = suitable to 5 = unsuitable. / * Peso de la variable. **Rango de aptitud: 10 = apto a 5 = no apto.

Source: Compiled by the authors based on data from García & Nava, 2010; Ruiz et al., 2013.
Fuente: Elaboración propia con datos de (García & Nava, 2010; Ruiz et al., 2013).

A. Potential erosion or susceptibility to erosion according to soil type: low (1), medium (2), and high (3).

A. Erosión potencial o susceptibilidad a la erosión de acuerdo con tipo de suelo: Baja (1), media (2) y alta (3).

B. Soil fragility by soil depth: shallow (3), moderate (2) and deep (1)

B. Fragilidad del tipo de suelo por profundidad de suelo: Superficiales (3), moderado (2) y profundo (1)

C. Organic matter content: low (3), medium (2) and high (1)

C. Concentración de materia orgánica: Baja (3), media (2) y alta (1)

D. Soil age: Young or shallow (3), medium (2) and well-developed or old (1).

D. Edad del tipo de suelo: nuevos o someros (3), medios (2) y bien formados o viejos (1).

The sensitivity of LU to degradation (Table 2) (Shishenko (1988) in Del Risco, 2002), was determined by combining the calculated values of potential natural instability (*En*) (Equation 1) with the potential land use for growing jalapeño pepper (Table 1).

La sensibilidad a la degradación de las UP (Cuadro 2) (Shishenko (1988) en Del Risco, 2002), se obtuvo de la combinación de los valores calculados de la inestabilidad natural potencial (*En*) (Ecuación 1) y del uso potencial para cultivo de chile jalapeño (Cuadro 1).

For the MCE, an evaluation matrix was constructed using the six criteria of the LU described above. The relative importance of each criterion for each land use was determined by assigning a weight ba-

Para la EMC se realizó una matriz de evaluación, con los seis criterios de las UP antes descritos. Se determinó la importancia relativa de cada criterio para

Table 2. Degradation sensitivity of land units for growing jalapeño peppers.
Cuadro 2. Sensibilidad a la degradación de las UP con cultivo de chile.

En	Potential use	LU sensitivity	
High /Alta	Suitable / Apto	Highly sensitive or vulnerable/Muy sensible o vulnerable	1
High /Alta	Moderately suitable / Semiapto	Sensitive type A / Sensible tipo A	2
Medium/ Media	Suitable / Apto	Sensitive type B / Sensible tipo B	3
Medium/ Media	Moderately suitable / Semiapto	Moderately sensitive type A / Moderadamente sensible tipo A	4
High /Alta	Slightly suitable and unsuitable / Poco apto y no apto	Moderately sensitive type B / Moderadamente sensible tipo B	5
Low / Baja	Slightly suitable and unsuitable / Poco apto y no apto	Moderately sensitive type C / Moderadamente sensible tipo C	6
Medium/ Media	Slightly suitable and unsuitable / Poco apto y no apto	Slightly sensitive type A / Poco sensible tipo A	7
Low / Baja	Moderately suitable / Semiapto	Slightly sensitive type B / Poco sensible tipo B	8
Low / Baja	Suitable / Apto	Very slightly sensitive / Muy poco sensible	9

Source: Compiled by the authors
Fuente: Elaboración propia

sed on expert consultation and the literature. The weighted sum was estimated using the Equation 2 (Shishenko (1988) in Del Risco, 2002):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

where:

r_i = capability for growing jalapeño pepper.

w_j = weight of criterion j , defined based on expert consultation and the literature.

x_{ij} = value of alternative i for criterion j .

The capability for growing jalapeño pepper (r_i) was integrated into the polygons of landscape units in the generated cartography. To prevent landscape units with potential for jalapeño production from overlapping with Protected Natural Areas (PNA), they were multiplied by a Boolean map (SEMARNAT-CONANP, 2020). LU identified as continuous, unfragmented natural vegetation were labeled using the INEGI (2017) map. For the climatic description of the landscape unit, the García & CONABIO (1998) map was used.

The map algebra was structured in a flowchart (Figure 1).

cada uso del suelo asignándole un peso por consulta a expertos y literatura. Para obtener la suma ponderada se utilizó la Ecuación 2 (Shishenko (1988) en Del Risco, 2002):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

donde:

r_i = capacidad para el cultivo de chile jalapeño.

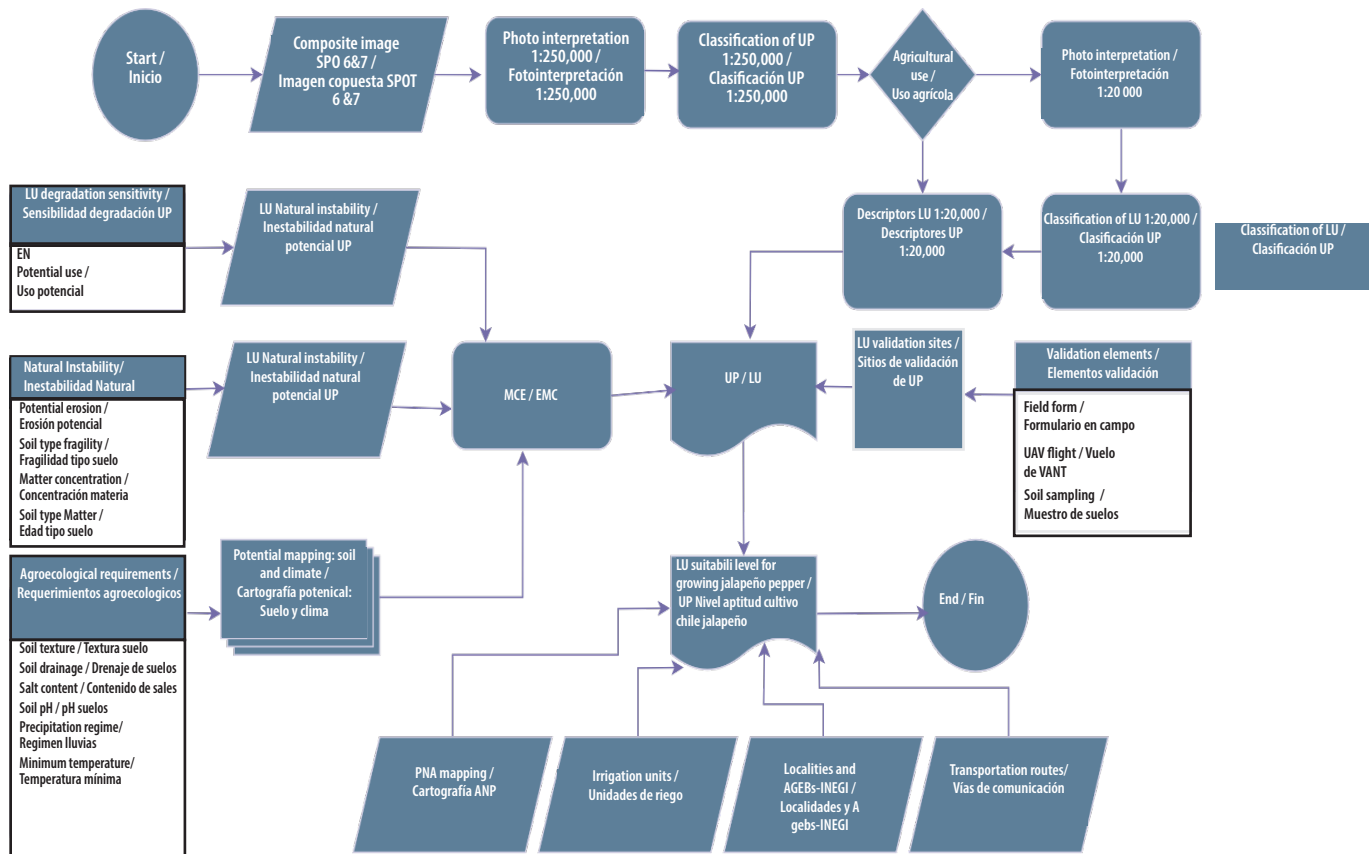
w_j = peso del criterio j , definido por expertos y literatura.

x_{ij} = valor de la alternativa i en el criterio j .

Con la capacidad para el cultivo de chile jalapeño (r_i) se integraron a los polígonos de las UP en la cartografía generada. Para evitar que las UP con potencial productivo para el chile jalapeño estuvieran dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP), se multiplicaron con un mapa booleano (SEMARNAT-CONANP, 2020). Las UP identificadas como vegetación natural continua sin fragmentación se etiquetaron usando la carta del INEGI (2017). Para la descripción climática de la UP se usó la carta de García & CONABIO (1998).

El álgebra de mapas se estructuró en un diagrama de flujo (Figura 1).

Figure 1. Flowchart of the map algebra for the potential use of land for growing jalapeño pepper.
Figura 1. Diagrama de flujo del álgebra de mapas del uso potencial para el cultivo de chile jalapeño.



Source: Compiled by the authors.
Fuente: Elaboración propia.

The final map includes, for each landscape unit and soil type, the level of suitability for growing jalapeño pepper. It also includes transportation routes (INEGI, 2019), localities and basic geo-statistical areas (Agebs) (INEGI, 2010), as well as the polygons of irrigation units and technified rainfed districts 2018 (CONAGUA, 2023).

Results and Discussion

Photo interpretation identified 26 LU classes, organized into three hierarchical levels. At the first level, the classes are grouped by their origin: nature, antropogenic, or transitional (Table 3). The second level represents the main use of the LU, organized as a super-class: agricultural, agro-pastoral, natural vegetation, water body, livestock, and urban area. The third level includes 26 classes, each combining the

La cartografía final contiene para cada UP y tipo de suelo, el grado de aptitud para producir chile jalapeño, se incluyeron las vías de comunicación (INEGI, 2019), localidades y áreas geoestadísticas básicas (Agebs) (INEGI, 2010) y los polígonos de las Unidades Riego y Distritos de Temporal Tecnificado 2018 (CONAGUA, 2023).

Resultados y Discusión

La fotointerpretación identificó 26 clases de UP jerarquizadas en tres niveles. En el primer nivel agrupa las clases por su origen: naturales, antrópicas o en transición (Cuadro 3). El segundo nivel engloba el uso principal de la UP como super clase: agrícola, agrícola-pecuaria, vegetación natural, cuerpo de agua, pecuaria y zona urbana. Y en el tercer nivel 26 clases, que incluye el nombre de la super clase y su descrip-

name of the super-class with a descriptor that distinguishes it from others, based on features such as texture, color tones, landscape continuity (fragmentation), adjacency, and management type. Each class is assigned a unique code for identification in the cartography.

The analysis found that in Quintana Roo, 38.4 % of the territory consists of dense natural vegetation (Veg1), and when combined with other natural vegetation areas (15.9 %), they account for 54.3 %; in contrast, the State Territorial Planning Strategy (EEOT) recognized in 2016 (official gazette, 2022) that 86.51 % of the state's surface corresponds to some type of natural vegetation.

The landscape units represent 23.7 % of the area and could be suitable for agriculture or as conservation areas for natural vegetation. Landscape units with semi-suitable conditions (suitability class 7) were not considered for crop potential, as they represent a land-use change of 796 329 ha, or 17.2 % (Table 3).

The six classes of agricultural landscape units are mainly found in the municipalities of José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Othón P. Blanco and Bacalar, these municipalities account for 69 657.30 ha of cultivated land, representing 93.78 % (SIAP, 2024).

Verification of the landscape units was conducted at 55 sites in the municipalities of José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Othón P. Blanco and Bacalar (Figure 2), which concentrate the highest diversity of intermingled landscape units and historical records of jalapeño pepper or vegetable plots. The accuracy of the landscape units in terms of class and boundaries at the validation sites was 85 %.

Among the sampling sites, 54 % were located in agricultural landscape units, 22 % in areas of natural vegetation, and 13 % in livestock farms. At the agricultural sites, the most common crops were mixed crops (22 %), vegetables (19 %), and corn (19 %) (Figure 2). Notably, only two sites with jalapeño pepper were found among the vegetable plots, indicating a possible reduction in the area cultivated with pepper.

Regarding the characteristics of the landscape units visited, 83 % were small producers, 11 % were larger producers practicing extensive management, and 6 % were subsistence farming. Manual tillage was practiced at 71 % of the sites, while 24 % used mechanical tillage. Among the agricultural sites, 61.5 %

tor que las diferencia entre sí, como los elementos de su textura, tonos o continuidad del paisaje (fragmentación), vecindad y tipo de manejo. Cada clase tiene una clave para identificarla en la cartografía.

El análisis reconoció que en Quintana Roo el 38.4 % del territorio son áreas de vegetación natural compacta (Veg1), y sumado a otras áreas de vegetaciones naturales (15.9 %), representan el 54.3 %; en contraste la Estrategia Estatal de Ordenamiento Territorial (EEOT) reconoció en 2016 (Periódico oficial, 2022) que el 86.51 % de la superficie estatal corresponde a algún tipo de vegetación natural.

Las UP de transición representan el 23.7 % de la superficie y podrían ser aptas para la agricultura o como zonas de conservación para la vegetación natural. Las UP con condiciones semiaptas (aptitud 7), no se consideraron para el potencial del cultivo al representar el cambio de uso de suelo de 796 329 ha en 17.2 % (Cuadro 3).

Las seis clases de UP agrícolas se encuentran principalmente en los municipios de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Othón P. Blanco y Bacalar, estos municipios representan 69 657.30 ha cultivadas con 93.78 % (SIAP, 2024).

La verificación de las UP se corroboró en 55 sitios en los municipios de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Othón P. Blanco y Bacalar (Figura 2). Al concentrar la mayor diversidad de UP entremezcladas y registros de parcelas históricas con chile jalapeño u hortalizas. El grado de asertividad de las UP en términos de clase y límites con los sitios de verificados fue del 85 %.

El 54 % de los sitios fueron en UP de uso agrícola, 22 % con vegetación natural, y finalmente 13 % granjas pecuarias. En los sitios con uso agrícola, prevalecieron los cultivos mixtos (22 %), hortalizas (19 %) y maíz (19 %) (Figura 2). Es de resaltar que en las de hortalizas solo se encontraron dos sitios de chile jalapeño; esto sugiere reducción en la superficie cultivada de chile.

Entre las características de las UP visitadas, el 83 % eran pequeños productores, 11 % grandes productores con manejo extensivo y el 6 % de autoconsumo. En el 71 % se practica la labranza manual y 24 % mecánica. De los sitios agrícolas verificados con riego 61.5 %, presurizado y por gravedad, coincidente con una agricultura poco tecnificada (Ayala et al., 2008). La incorporación de rastrojos es una práctica común, el 53 % de los sitios agrícolas tenían materia orgánica del

Table 3. LU classes and their suitability for growing jalapeño pepper.
Cuadro 3. Clases de las UP y la aptitud para el cultivo del chile jalapeño.

Origin / Origen	Super class / Super clase	Clave clase / Class code	Class name / Nombre de la clase	Crop suitability / Aptitud cultivo	Area ha / Superficie ha	%
Anthropic / Antrópico	Agricultural / Agrícola	Agr1	Intensive dense, large areas (>139 ha), rectangular in shape, irrigated or not. Newly opened and bordered by natural vegetation. / Intensiva Compacta, áreas extensas (>139 ha), de forma rectangular, de riego o no. Recién abiertas y delimitadas por vegetación natural.	10	20 697	0.5
		Agr2	Intensive dense, medium-sized areas, square or rectangular in shape, 50 % rainfed and 50 % irrigated. May or may not include urban areas. Newly opened and bordered by natural vegetation / Intensiva Compacta, áreas medianas, de forma cuadrada o rectangular, 50 % de temporal y 50 % de riego. Pueden o no incluir zonas urbanas. Recién abiertas y delimitadas por vegetación natural.	10	129 381	3.0
		AgrE3	Extensive, small-producer areas, irregular shapes in expansion, up to 50 % rainfed or irrigated, near or within urban areas. Bordered by natural vegetation. / Extensiva, áreas de pequeños productores, formas irregulares en crecimiento, de temporal hasta 50 % o riego, cercanas o zonas urbanas. Delimitadas por vegetación natural.	10	77 053	1.8
		AgrE4	Extensive, small-producer areas, square-shaped, rainfed or irrigated, near population centers. / Extensivas, áreas de pequeños productores, forma cuadrada, de temporal o riego, cercanas a centros de población.	10	23 325	0.5
		AgrE5	Extensive, small new areas, bordered by natural vegetation and respecting changes in terrain slope, up to 75 % rainfed. / Extensiva, áreas pequeñas nuevas, delimitadas por vegetación natural y respetada por cambio en las pendientes del terreno, hasta el 75 % de temporal.	10	13 848	0.3
		AgrE6	Extensiva, no Compacta en sistema de tumba y quema o nuevas unidades de producción, áreas pequeñas de forma irregular, principalmente de temporal, delimitadas por vegetación natural conservada. Lejana a centros de población. / Extensive, non-dense in slash-and-burn systems or new production units, small irregularly shaped areas, mainly rainfed, bordered by conserved natural vegetation. Distant from population centers.	10	566 381	13.0
	Agricultural Livestock Agícola / Pecuaría	Pz 1 / GS 1	Artificial livestock grassland, with secondary vegetation in succession or abandoned. May be mixed with agricultural areas. / Pastizal artificial ganadero, con vegetación secundaria en sucesión o abandonadas. Puede estar mezclada con zonas agrícolas.	10	9 182	0.2
		VegAgr1	Fragmentada y perturbada, con zonas agrícolas que ocupan entre 50 y 75 %. / Fragmented and disturbed, with agricultural areas occupying 50-75 %.	7	415 628	9.5
	Natural vegetation / Vegetación natural	VegAgr2	Fragmented and disturbed with agricultural areas in patches less than 50 %. / Fragmentada y perturbada con zonas agrícolas en manchones menores al 50 %.	7	257 130	5.9
		VegAgr3	Fragmented and disturbed with agricultural areas in patches less than 25 %. / /Fragmentada y perturbada con zonas agrícolas en manchones menores al 25 %	7	73 394	1.7
		Veg 1	Medium semi-deciduous forest to High evergreen rainforest. / Selva mediana a alta compacta.	1	1 679 255	38.4
		Veg 2	Shrub forest to medium semi-deciduous forest. / Selva arbustiva y mediana compacta.	1	178 967	4.1
		Veg3	Mangroves, wetlands / Mangles, humedales	1	35 337	0.8
		Veg 4	Petenes	1	184 489	4.2
		Veg 5	Wetlands and small petenes. / Humedales y petenes pequeños.	1	43 873	1.0

Table 3. LU classes and their suitability for growing jalapeño pepper.
Cuadro 3. Clases de las UP y la aptitud para el cultivo del chile jalapeño.

Origin / Origen	Super class / Super clase	Clave clase / Class code	Class name / Nombre de la clase	1	Area ha / Superficie ha	%
Natural	Natural vegetation / Vegetación natural	Veg 6	Coastal wetlands and bodies of water. / Humedales costeros y cuerpos de agua.	1	3 394	0.1
		Pz 2	Natural grassland-Coastal dunes with low, creeping vegetation / Pastizal natural-Dunas costeras con presencia de vegetación baja-rastrera.	1	2 592	0.1
		Veg 7	Mangrove. Aquatic vegetation, Shallow Waters with some petenes in patches. / Manglar. Vegetación acuática, aguas someras con algunos petenes en manchones.	1	245 555	5.6
		Veg 8	Deciduous or cleared natural grasslands. / Pastizales naturales caducifolios o desmontadas.	1	42 580	1.0
	Wather / Agua	B Wather / C Agua	Deciduous or cleared natural grasslands. / Cuerpo de agua superficial.	0	88	0.001
		LS1 / Pec1	Livestock farms. / Granjas pecuarias.	0	36 739	0.8
		UA1 / ZU1	Dense / Compacta.	0	21 689	0.1
	Urban area / Zona urbana	UA2 / ZU2	With green backyards. / Con traspatios verdes.	0	3 716	0.1
		UA3 / ZU3	Residential areas or hotel complexes, non-compact, with residential characteristics and large green areas. / Residenciales o complejos hoteleros, no compactas con características residenciales con grandes extensiones de áreas verdes.	0	22 680	0.5
	Urban area / Zona urbana	NV-UA/ VN-ZU	Fragmented natural mangrove vegetation mixed with growing urban areas. / Vegetación natural de mangle fragmentada mezclada con zona urbana en crecimiento.	1	4 421	0.1
TOTAL					4 369 134	100

Transition = The units are in transition from natural to anthropic. Agr/LS = Agricultural - livestock.

Transición = Las unidades son de transición de natural a antrópico. Agr/pec = Agrícola - pecuario.

Source: Compiled by the authors.

Fuente: Elaboración propia.

had irrigation, either pressurized or gravity-fed, consistent with low-technification agriculture (Ayala et al., 2008). Incorporating crop residues is a common practice: 53 % of the agricultural sites contained organic matter from the previous cycle. Concerning environmental conditions, 69 % of the sites were located on plains and 31 % on hills. Additionally, 53 % of the sampled agricultural sites showed some type of physical soil erosion (Figure 3).

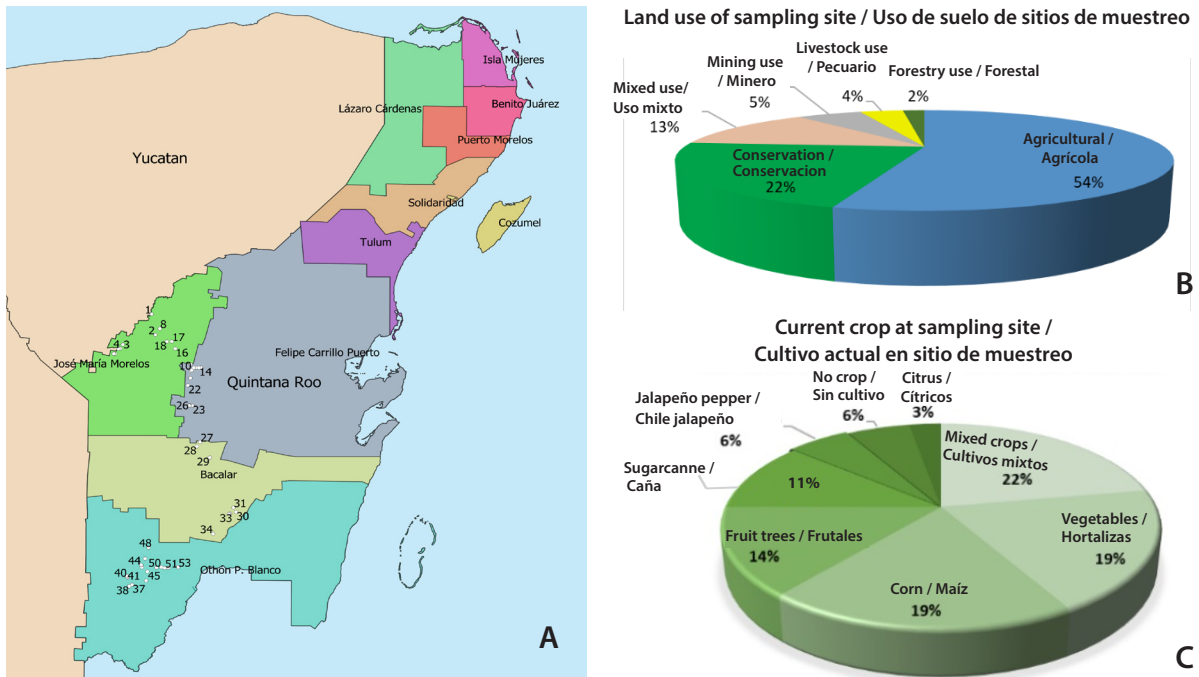
Regarding soil texture at the crop validation sites, clayed soils predominated (62 %), followed by sandy clay loam (23 %) and clayey sand (15 %). Soil pH ranged from 7.1 to 7.9, which only slightly limits jalapeño pepper root growth. The crop grows best in loamy soils with low salt content (Castellanos, 2000; García & Nava, 2010; Ruiz et al., 2013).

ciclo anterior. Respecto a las condiciones ambientales, 69 % de los sitios son planicies y 31 % lomeríos. El 53 % de los sitios agrícolas muestreados presentaban algún tipo de erosión física de suelo (Figura 3).

En términos de textura del suelo, en los sitios de verificación de cultivo; predominó el arcilloso (62 %), seguidos por 23 % franco arcilloso arenoso y el 15 % arcilloso arenoso. Mientras que el pH osciló entre 7.1 a 7.9 y se configura en una restricción débil para chile jalapeño desarrollo apropiado de las raíces, el cultivo prefiere texturas francas y con baja concentración de sales (Castellanos, 2000; García & Nava, 2010; Ruiz et al., 2013).

Del análisis de la información climática y de acuerdo con los requerimientos agroecológicos del cultivo de chile jalapeño, la región no tiene restricción climática. El 92.2 % de las UP agrícolas se ubican

Figure 2. Validation sites A) Location, B) Type of land use and C) Type of crop.
Figura 2. Sitios de verificación A) Ubicación, B) Tipo de uso del suelo y C) Tipo de cultivo.



Source: Compiled by the authors.
 Fuente: Elaboración propia.

Based on the analysis of climatic information and the agroecological requirements of jalapeño pepper, the region has no climatic restrictions. A total of 92.2 % of the agricultural landscape units are in the Aw1(x') climate, with annual precipitation ranging from 1 117 to 1 323 mm. Mean annual temperatures range from 25.9 to 26.7 °C, with average minimum temperature above 18 °C and average maximum temperature between 28.6 to 30.7 °C (CONAGUA, 2024; García & CONABIO, 1998).

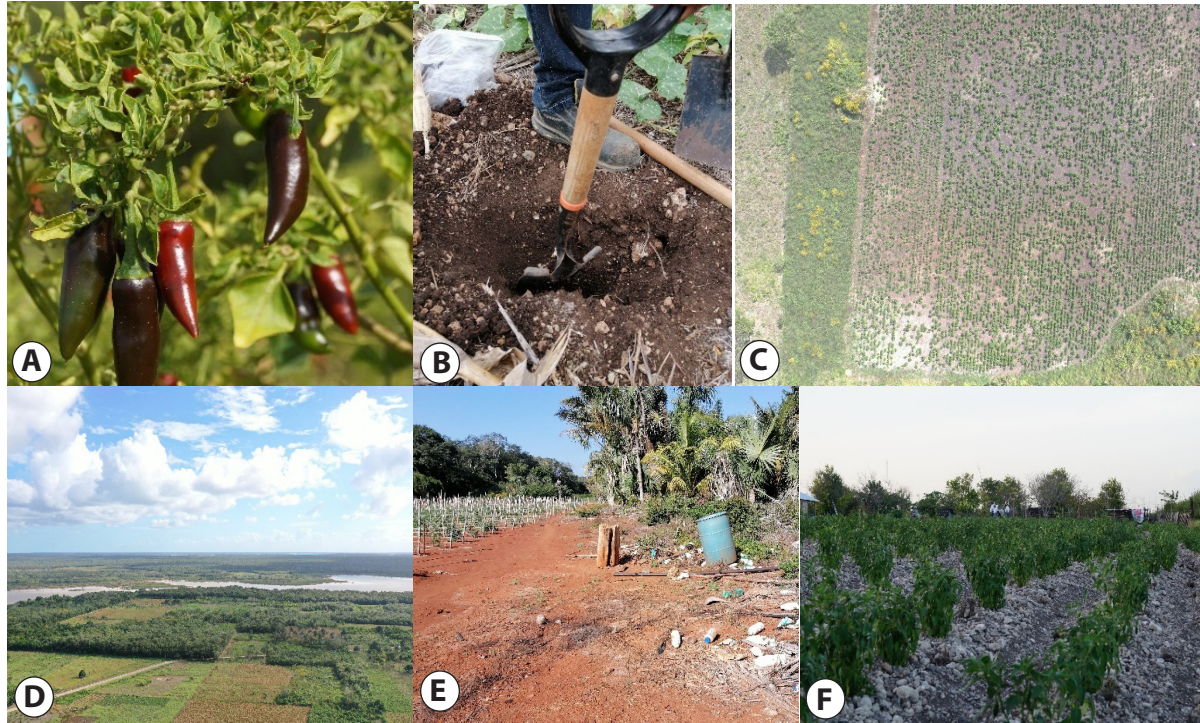
The MCE analysis estimated 876 038.2 ha in Quintana Roo with potential for growing jalapeño pepper, representing 19.0 % of the state's area or 44.8 % of the agricultural horizon (Table 5 y Figure 4). However, not all of these areas have irrigation infrastructure to take advantage of the favorable climatic period, as the irrigated surface covers only 43 479.96 ha (CONAGUA, 2023). Díaz-Padilla et al. (2012) reported that Quintana Roo had 73 972 ha with high productive potential and 248 ha unsuitable for *C. annum* L. Differences in surface area between this study and previous estimates are attributed to the cartographic datasets used, specifically the SPOT satellite-based digitization of landscape units used here. Moreover,

en el clima Aw1(x') con acumulados anuales de precipitación de 1 117 a 1 323 mm. Temperaturas medias anuales entre 25.9 a 26.7 °C, mínimas promedio mayor a 18 °C y máximas promedio de 28.6 a 30.7 °C (CONAGUA, 2024; García & CONABIO, 1998).

El análisis EMC estimó una superficie con potencial para el cultivo de chile jalapeño para Quintana Roo de 876 038.2 ha; que representan el 19.0 % del territorio estatal o el 44.8 % del horizonte agrícola (Cuadro 5 y Figura 4). Desafortunadamente para aprovechar la ventana climática, no toda el área cuenta con infraestructura de riego, puesto que la superficie irrigada es de 43 479.96 ha (CONAGUA, 2023). Por su parte, Díaz-Padilla et al. (2012), concluyeron que Quintana Roo tenía 73 972 ha con potencial productivo alto y 248 ha no aptas para *C. annum* L. La diferencia en superficie con los resultados de este trabajo se debe a la base cartográfica utilizada contra la digitalización de UP de imágenes satelitales SPOT. Además de la inclusión de la sensibilidad como variable ponderada dentro de la evaluación multicriterio para las UP.

En este trabajo se generaron 15 cartas nombradas como la localidad más importante. En la Figura 4,

Figura 3. Sitios de muestreo en parcelas históricas o actuales de chile jalapeño
Figure 3. Sampling sites in historical or current jalapeño pepper plots.



A) Jalapeño pepper in maturation, **B)** Squash crop in El verdón José María Morelos, on eutric nitosol soil ; **C)** RGB photograph captured by UAV of jalapeño pepper in Nicolas Bravo, O. P. Blanco, on rendzina soil, **D)** Agricultural landscape unit suitable for pepper crop in San Isidro La Laguna, Bacalar, on pellic vertisol soil; **E)** Historical jalapeño pepper plot in Pool-Yuk, JMM, with improper agrochemical container management, on rendzina soil and **F)** Jalapeño pepper under unsuitable conditions in San Román Bacalar. /

A) Chile jalapeño en maduración, **B)** Cultivo de calabaza en El verdón JMM, suelo Nitosol Eutricto; **C)** Fotografía en RGB con VANT en chile jalapeño en Nicolas Bravo, O. P. Blanco, suelo Rendzina, **D)** UP agrícola apta para el cultivo de chile en San Isidro La Laguna, Bacalar, suelo Vertisol Pélico **E)** Parcela histórica de chile jalapeño en Pool-Yuk, JMM, con manejo inadecuado de envases de agroquímicos, suelo Rendzina y **F)** Chile jalapeño en condiciones no aptas, San Román Bacalar.

Photographs by: Lomas-Barrié, January and February 2020.
Autor de las fotografías: Lomas-Barrié, enero y febrero 2020.

this study incorporated sensitivity as a weighted variable in the multicriteria evaluation of the LU.

In this study, 15 maps were generated, each named after the most relevant locality. Figure 4 shows the “Nicolas Bravo” map, located in the southern region and historically important for jalapeño pepper production. All cartographic products are archived at INIFAP.

Conclusions

The MCE analysis identified that 19.0 % of the territory of Quintana Roo, equivalent to 876 038.2 ha, is suitable for growing jalapeño pepper. The validity of the method is supported by cartography based on Landscape Units and validated in the field with UAV imagery.

The areas with the greatest potential for implementing public policies to promote jalapeño pepper

se muestra la carta “Nicolas Bravo” ubicada al sur y con importancia histórica en el cultivo del chile jalapeño. La cartografía se encuentra resguardada en el INIFAP.

Conclusiones

La EMC permitió detectar que el 19.0 % del territorio del Estado de Quintana Roo es apto para el cultivo del chile jalapeño y representa 876 038.2 ha. La robustez del método se sustenta en la cartografía generada con uso de Unidades de Paisaje, y la validación en campo con imágenes obtenidas de vuelos con VANT.

Las áreas con mayor potencial para establecer una política pública de impulso a la producción de chile jalapeño son las clases Agr 1 y Agr 2, que se caracterizan por ser compactas y representan el 3.5 % del territorio, donde el reforzamiento de la infraes-

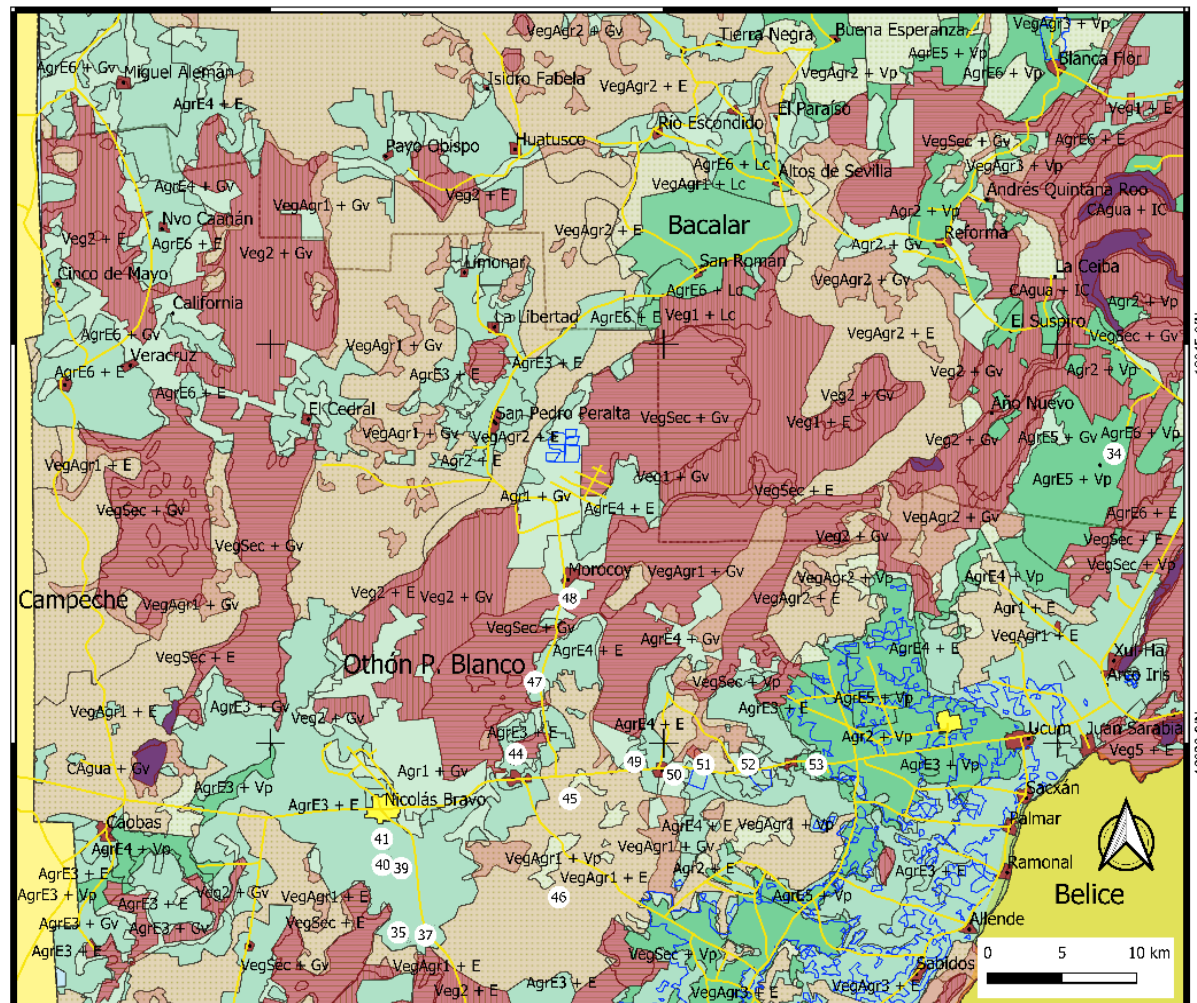


Base symbology / Simbología base

	Agricultural area / Agrícola
	Vegetation agriculture / Vegetación agricultura
	Vegetation natural / Vegetación natural
	Grassland natural / Pastizal natural
	Natural vegetation-wet / Vegetación natural-húmeda

- Not suitable / No apto
- Semi suitable / Semiapto
- Suitable / Apto

Figure 4 B. Mapping of potential areas for growing jalapeño pepper in the state of Quintana Roo.
Figura 4 B. Cartografía de las zonas potenciales para el cultivo de chile jalapeño en el estado de Quintana Roo.



B Land suitability zoning for growing jalapeño pepper in Quintana Roo /
 Zonificación de la aptitud para cultivo de chile jalapeño en Quintana Roo
 Nicolas Bravo

Symbology / Simbología

Base symbology / Simbología base

--- Municipal boundaries / Límites municipales

Highways / Carreteras

■ Rural localities / Localidades rurales

• Urban localities / Localidades urbanas

□ Risk_units / Unidades_riesgo

Landscape units+ type of soil / U. paisaje+ tipo suelo

□ Agricultural area / Agrícola

■ Vegetation agriculture / Vegetación agricultura

■ Vegetation natural / Vegetación natural

■ Grassland natural / Pastizal natural

■ Natural vegetation-wet / Vegetación natural-húmeda

■ Urban area / Zona urbana

■ Body of water / Cuerpo de agua

**Suitability of LU for jalapeño pepper /
 Aptitud UP chile jalapeño**

■ Not suitable / No apto

■ Semi suitable / Semiapto

■ Suitable / Apto

production are the Agr 1 and Agr 2 classes, which are dense and account for 3.5 % of the territory. In these areas, strengthening infrastructure and building a critical mass of producers would be most efficient.

Microrelief conditions in the region create soil characteristics that are not detectable at a 1:20000 scale. These local features could influence irrigation layout, fertilization, and other field-level management decisions.

Acknowledgments

The author thanks D.h. Perla Ávila Pat and Biol. Abraham Ake Be, Ing. Jorge Velázquez Toledo (CESAVEQROO), and CONACYT-Gobierno del Estado de Quintana Roo for the funding for the Project QROO-2018-02-01-97481 *“Estrategia integral e innovación tecnológica para impulsar la productividad de la cadena de valor del chile jalapeño en Quintana Roo”*.

End of English version

estructura y la formación de masa crítica sería más eficiente.

Las condiciones de micro relieve en la región generan características particulares de suelo que a escala 1:20000 no es detectable. Estas particularidades podrían modificar el acomodo del riego, la fertilización y otras decisiones en el manejo parcelario.

Agradecimientos

A la D.h. Perla Ávila Pat y al Biol. Abraham Ake Be. Al Ing. Jorge Velázquez Toledo del CESAVEQROO. Al Fondo mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Quintana Roo por el financiamiento del proyecto QROO-2018-02-01-97481 *“Estrategia integral e innovación tecnológica para impulsar la productividad de la cadena de valor del chile jalapeño en Quintana Roo”*.

Fin de la versión en español

References / Referencias

- Ayala, A., Schwentesius, R., Gómez, M., & Almaguer, G. (2008). Competitividad del frijol mexicano frente al de Estados Unidos en un contexto de liberalización comercial. *Región y sociedad* 20(42): 37-62.
- Bakkear, J. C. & Van-Uffelen, J. A. M. (1988). The effects of diurnal temperature regimes on growth and yield of glasshouse sweet pepper. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36:201-208 <https://library.wur.nl/ojs/index.php/njas/article/view/16670/16084>
- Barredo, J. I. C. (1996). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. RAMA, Madrid. 265 p.
- Castellanos, R. J. Z. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Guanajuato, México 186 p.
- Castro-Rocha, A., Fernández, P. S. P., & Osuna, A. P. (2012). Mecanismos de defensa del chile en el patosistema *Capsicum annum-Phytophthora capsici*. *Revista Mexicana de Fitopatología* 30:49-65.
- CESAVEQROO. (2019). Base de datos de productores de hortalizas en el estado de Quintana Roo, del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Quintana Roo.
- CONAGUA. (2023). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). <https://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- CONAGUA. (2024). Base de datos de las estaciones convencionales. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Dang, M. (2024). Assessment of crop-land suitability by the multi-criteria evaluation approach and geographic information system: A scoping review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 26(2). <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/9049>
- Del Risco, Y. Y. (2002). Diagnóstico ambiental y aproximado al ordenamiento geoecológico de “Escaleras de Jaruco” Tesis en opción al título de máster en Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. Universidad de la Habana, Facultad de Geografía. La Habana Cuba.
- Díaz-Padilla, G., Guajardo-Panes, R., Medina-García, G., Sánchez-Cohen, I., Soria-Ruiz, I., Vázquez-Alvarado, J. M., Quijano-Carranza, J. A., Legorreta-Padilla, F., & Ruíz-Corral, J. A. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP Publicación Especial 8.
- Díaz-Plaza, R., Avilés-Baeza, W., Torres-Pacheco, I., & Rivera-Bustamante, R. (1996). Geminivirus en la región Hortícola de

- Yucatán, México. In: Memorias del Taller de moscas blancas. Acapulco, México. P. 193.
- Echavarría-Chávez, F., & Medina-García, G. (2015). Uso potencial del suelo y potencial productivo de cultivos como herramientas para direccionar la reconversión productiva. En: Echavarría-Cáñez, F. (comp). Reconversión productiva para el ordenamiento agropecuario. CEDRSSA y LXII Legislatura de la Cámara de Diputados. 31-45p. https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Chairez/publication/323783593_Reconversion_productiva_para_el_ordenamiento_agropecuario/links/5aaab254aca272d39cd7a20c/Reconversion-productiva-para-el-ordenamiento-agropecuario.pdf
- ERMEX. (2020). Monitoreo satelital. Pubhtml <http://online.pubhtml5.com/clsi/mhph/#p=1>. De la página oficial <https://www.gob.mx/siap/articulos/antena-ermex>. Consultada (22 de septiembre de 2020).
- García, E., & CONABIO. (1998). Climas, escala 1:1000000. CONABIO. México
- García, J. A., & Nava, R. (2010). El chile jalapeño: su cultivo de temporal en Quintana Roo. Folleto técnico No. 2 CIRSE-INIFAP. México. 64 p.
- García-Nieto, H., López-Blanco, J., Moreno-Sánchez, R., Villers-Ruiz, M., & García-Daguer, R. (1999). Potencial agrícola del Distrito de Desarrollo Rural 004, Celaya, Guanajuato, México. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando SIG. Investigaciones Geográficas N. 38 69-83. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n38/n38a7.pdf>
- Gaspar-Moctezuma, T. F. (2019). Etnobotánica y caracterización morfológica del chile jalapeño criollo (*Capsicum annum* var. *annuum* L.) en la región centro de Veracruz. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. México. https://www.uv.mx/met/files/2019/10/Thania_Francely_Gaspar_Moctezuma.pdf
- Gurri-García, F. D., & Vallejo-Nieto, M. I. (2007). Vulnerabilidad en campesinos tradicionales y convencionales de Calakmul, Campeche, México. Secuelas del huracán "Isidore". En: Civera-Cerecedo, M. y Herrera-Bautista, M. R. (2007) Estudios de Antropología Biológica, volumen XIII: 449-47. Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. 451-470p.
- INEGI. (2010). Áreas Geoestadísticas Municipales, 2010. Escala: 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2010gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no. Acceso 23 de octubre de 2020
- INEGI. (2017). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (continuo nacional) CONABIO. México
- INEGI. (2019). Carta Topográfica Digital escala 1:250 000. www.inegi.org.mx
- INEGI. (2020). Carta Hipsométrica Digital escala 1:1 000 000. www.inegi.org.mx
- INIFAP & CONABIO. (2001). Cartografía Edafología escalas 1:250000 y 1:1000000. México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/topog/infgrt/indi50kgw
- Keys, E., & Roy-Chowdhury, R. R. (2006). Cash crops, smallholder decision-making and institutional interactions in a closing frontier: Calakmul, Campeche, Mexico. Journal of Latin American Geography, 5 (2), 2006
- Loeza-Kuk, E., Gerónimo-Romero, A., Lomas-Barrié, C., Cicero-Jurado, L., Rangel-Fajardo, M. A., & López-Chacón, A. (2014). Comportamiento temporal de biotipos de mosca blanca y adquisición de begomovirus en *Capsicum chinense*. In: Memorias: 1er. Congreso Internacional de Investigación Agropecuaria y Forestal. UAA. México. <https://es.scribd.com/document/353534837/Libro-Del-Congreso-Internacional-de-Investigacion-Agropecuaria-y-Forestal> o <https://www.uaa.mx/eventos/agosto/congreso.pdf>
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York: Wiley.
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, A., Martínez-Parra, R. A., & Ortiz-Valdez, M. (1997). Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. Agric. Téc. Méx. 23(1):69-90
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., & Zarazúa-Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. Rev. Mex. Cienc. Agric. Pub Esp. 13: 2465-2474
- Mendoza, M. E., & Bocco, G. (1998). La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. En: Serie Varia. Instituto de Geografía, UNAM. México. Núm. 17: 25-55
- Mugiyo, H., Chimonyo, V. G. P., Sibanda, M., Kunz, R., Masemola, C. R., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2021). Evaluation of Land Suitability Methods with Reference to Neglected and Underutilised Crop Species: A Scoping Review. Land, 10(2), 125. DOI: 10.3390/land10020125
- Ortega, M. (2020). La inserción de la agricultura mexicana al mercado mundial (1990-2018), efectos económicos y espaciales: el caso del frijol. En: Leal, P. (2020). Diferentes miradas de la inserción de México a la economía mundial. UNAM. 328p.
- Ortiz-Solorio, C. A., & Cuanalo de la Cerda, H. E. (1978). Metodología del levantamiento fisiográfico: un sistema de clasificación de tierras. Posgrado de Edafología. Colegio de Postgraduados. 85 pp.

- Periódico oficial. (2022). Estrategia estatal de ordenamiento territorial de Quintana Roo. Tomo 1 Núm 35 extraordinario. 83p. Página oficial: <https://qroo.gob.mx/sedetus/bitacorateritorial/estrategia-estatal-de-ordenamiento-territorial-qroo-eeot>. Consultada (10 de julio de 2024).
- Plantinga, A. J. (2015). Integrating Economic Land-Use and Biophysical Models. *Annual Review of Resource Economics*, 7, 233-249. DOI: 10.1146/annurev-resource-100814-125056
- Robles-Hernández, L., González-Franco, A. C., Gill-Langarica, E., Pérez Moreno, L., & López-Díaz, J. C. (2010). Virus fitopatógenos que afectan al cultivo de chile en México y análisis de las técnicas de detección. *Tecnociencia Chihuahua* 4(2): 72-86. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/715/815>.
- Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., González, I. J. A., Flores, H. E. L., Ramírez, O. G., Ortiz, T. C., Byerly, M. K. F., & Martínez, P. R. A. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564 p
- Salinas, E. C. (1997). Planificación ambiental y ordenamiento geológico. En: Memorias del II Taller sobre Ordenamiento Geológico de los paisajes, la Habana, Cuba. Facultad de Geografía de la Universidad de La Habana.
- Schnaid-Cámara, A. (2017). Tepich y la economía de Quintana Roo 2015. Revista electrónica semestral Universidad de Quintana Roo. 3: 9-49. <https://www.uqroo.mx/files/revista-vita-et-tempus/revista-vita-et-tempus-numero-3b.pdf>
- SEMARNAT-CONANP. (2020). Áreas Naturales Protegidas Federales de México, agosto 2020, edición: 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México, México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/anp2020gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Shishenko, P. (1988). Geoecología de los paisajes (en ruso: ландшафтная геоэкология). Ed escuela superior de Kiev, Ucrania. (pág 32-54).
- SIAP (2024). SIACON, Sistema de Información Agroalimentaria de consulta de Avance de siembras y cosechas por municipio. https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Sotelo-Ruiz, E. D., Cruz-Bello, G. M., González-Hernández, A., & Moreno Sánchez, F. (2016). Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. *Rev. Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(2):401-412 <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263145278015.pdf>
- Turner, B. L. II, & Robbins, P. (2008). Land-Change Science and Political Ecology: Similarities, Differences, and Implications for Sustainability Science. *Annual Review of Environment and Resources*, 33, 295-316. DOI: 10.1146/annurev.environ.33.022207.104943
- Tuz, L. E. (19 de julio de 2015). Desaparece el cultivo de picante. Diario por esto Quintana Roo. <https://diarioporestoqroo.wordpress.com/2015/07/09/desaparece-el-cultivo-de-picante/>
- Vasu, D., Srivastava, R., Patil, N. G., Tiwary, P., Chandran, P., & Singh, S. K. (2018). A comparative assessment of land suitability evaluation methods for agricultural land use planning at village level. *Land Use Policy*, 79, 146-163. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.08.007