

EVALUACIÓN TERRITORIAL PARA EL CULTIVO DEL AGUACATE (*Persea americana* Mill. cv. Hass) EN LA REGIÓN DEL PICO DE TANCÍTARO, MICHOACÁN, MÉXICO

TERRITORIAL ASSESSMENT FOR AVOCADO CULTIVATION (*Persea americana* Mill. cv. Hass) IN THE REGION OF PICO DE TANCÍTARO, MICHOACAN, MEXICO

Luis G. **Ramírez-Sánchez**^{1*}, Luis M. **Morales-Manilla**², Iván **Vilchis-Mata**¹,
Armando **Trujillo-Herrada**¹, Danays del C. **Castelo-Agüero**²

¹Cátedras CONACyT-El Colegio Mexiquense A. C. Ex-Hacienda Santa Cruz de los Patos S/N, Colonia Cerro del Murciélago, C. P. 51350, Zinacantepec, Estado de México. (lramirez@cmq.edu.mx). ²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Antigua Carretera a Pátzcuaro #8701, Ex-Hacienda San José de la Huerta, C. P. 58190 Morelia, Michoacán.

RESUMEN

La Región del Pico de Tancítaro con 67 456 ha es una de las zonas con mayor producción de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en Michoacán, México. Al inicio de la década de 1970 empezó el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo para el cultivo de aguacate, acelerándose desde la década de 1990. Así, el objetivo de este estudio fue evaluar la aptitud territorial para este cultivo con el conocimiento local del paisaje en la Región, la implementación del modelo Agrilocal y la premisa de que algunos de los factores socioeconómicos y ambientales que los agricultores consideren para determinar cuales zonas son más aptas para el cultivo de aguacate, están contenidos en los patrones espaciales actuales e históricos de la distribución de este cultivo (observables en imágenes de satélite). Los resultados del modelo Agrilocal indicaron que la mayoría de las zonas de aptitud óptima, dentro de la región de estudio, se usan para el cultivo de aguacate (clases de aptitud alta y muy alta) en 87 y 62 % de la superficie, respectivamente. Esto muestra que las zonas con mayor potencial para implementar este cultivo son escasas, en particular por la competencia entre el crecimiento de los asentamientos humanos, la expansión de otros cultivos y el propio cultivo de aguacate en la región. La aplicación del modelo Agrilocal se estimó deseable en las demás regiones del estado de Michoacán, donde el cultivo de aguacate es importante para la economía local. Permitir la expansión descontrolada del cultivo puede ocasionar deterioro ambiental y poner en riesgo la sustentabilidad de esta actividad en el estado.

Palabras clave: Pico de Tancítaro, modelo Agrilocal, cultivo de aguacate, evaluación de tierras.

ABSTRACT

The region of Pico Tancitaro, with 67 456 ha, is one of the areas with the highest production of avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass) in Michoacan, Mexico. The first changes in vegetation and use of soil for the cultivation of avocado occurred in the early 1970s; these changes increased as of the 1990s. Thus, the aim of this study was to evaluate the land suitability for this crop with the local knowledge of the Region landscape and implement the Agrilocal model, with the premise that some of the socioeconomic and environmental factors that the farmers consider to determine which areas are more suited for avocado cultivation, are contained in the current and historical spatial patterns of distribution of this crop (observed in satellite images). The Agrilocal model results indicate that 87 and 62 % of the areas with the highest suitability (high and very high suitability categories, respectively), within the area of study, are used for the cultivation of avocado. This shows that the areas with the highest potential to implement this crop are scarce, mainly due to the competitiveness between the growth of human settlements, the expansion of other crops, and the cultivation of avocado itself in the region. The application of the Agrilocal model was estimated desirable in the rest of the State of Michoacan regions, where the cultivation of avocado is important for the local economy. Allowing the uncontrolled expansion of this crop can cause environmental deterioration and put at risk the sustainability of this activity in this state.

Key words: Pico de Tancítaro, Agrilocal model, avocado cultivation, land evaluation.

INTRODUCTION

The environmental degradation due to human activities is a continuous phenomenon; since the beginning, human beings have

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2018. Aprobado: febrero, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 53: 487-503. 2019.

INTRODUCCIÓN

El deterioro ambiental por las actividades humanas es un fenómeno continuo, desde su aparición, el hombre ha modificado el medio natural (CONAZA, 1994; Perevochtchikova y Ochoa, 2012) y este deterioro ha sido a escala local y mundial. Es necesario adoptar medidas claras, para aprovechar y conservar los recursos naturales de manera adecuada (Elaalem *et al.*, 2010; Maddahi *et al.*, 2014; Van Berkel y Verburg, 2014; Akinci *et al.*, 2017).

La Región del Pico de Tancítaro (RPT) es otro ejemplo de uso inapropiado del terreno que conlleva la explotación ineficiente de los recursos naturales, la destrucción del recurso tierra, pobreza y otros problemas sociales (Garibay y Bocco, 2000; Burgos *et al.*, 2012). La sociedad debe entender que la tierra es un recurso que debe usarse de acuerdo con su capacidad, con la finalidad de satisfacer las necesidades humanas, pero sin descuidar las de las generaciones futuras y mantener los ecosistemas terrestres, al realizar un manejo sustentable de los recursos naturales (Plan Nacional de Desarrollo, 2012).

Parte de la solución al problema del uso inadecuado de la tierra es conocer los cambios del uso del suelo en el tiempo, con la finalidad de ayudar a planear el uso racional, apropiado y sustentable de los recursos humanos y naturales (Rossiter, 1996; Mayorga, 2001; Martínez-Vega y Romero-Calcerrada, 2012).

Al inicio de 1970, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), respaldó a grupos de trabajo para desarrollar un marco para la evaluación de tierras (*Framework For Land Evaluation*) publicado en FAO (1976), el cual marca las pautas y estrategias para realizar dicha evaluación, para lograr uniformidad de todos los sistemas anteriores. A través de los años, la FAO y sus grupos de trabajo han publicado una serie de manuales y boletines donde exponen las estrategias para la evaluación de tierras para la agricultura en secano (FAO, 1983), la silvicultura (FAO, 1984), la agricultura de riego (FAO, 1985), los usos forestales (FAO, 1990) y el pastoreo extensivo (FAO, 1991).

La demanda creciente y competitiva por tierra para la producción agrícola y otros propósitos, requiere tomar decisiones sobre el uso más beneficioso del recurso tierra y, al mismo tiempo, para su conservación en el futuro (Zonneveld, 1989; Rossiter, 1996; Martin and Saha, 2009; Sonneveld *et al.*, 2010). En el mundo se

modified the natural environment (CONAZA, 1994; Perevochtchikova and Ochoa, 2012), and we can see this degradation at a local and global scale. It is necessary to adopt clear measures in order to exploit and preserve the natural resources sustainably (Elaalem *et al.*, 2010; Maddahi *et al.*, 2014; Van Berkel, and Verburg, 2014; Akinci *et al.*, 2017).

The Region of Pico de Tancítaro (RPT) is another example of improper use of land and the resulting inefficient exploitation of natural resources, the destruction of the soil, poverty, and other social issues (Garibay and Bocco, 2000; Burgos *et al.*, 2012). Society must understand that the soil is a resource that must be used according to its capacity, in order to satisfy human necessities, but without neglecting the needs of future generations and maintaining the terrestrial ecosystems, by the implementation of sustainable practices (Plan Nacional de Desarrollo, 2012). Part of the solution to the problem of the improper use of soil is to learn the different uses of soil through time, with the aim to help to plan the rational, appropriate, and sustainable use of human and natural resources (Rossiter, 1996; Mayorga, 2001; Martínez-Vega, and Romero-Calcerrada, 2012).

At the beginning of 1970, the Food and Agriculture Organization (FAO), supported working groups to develop a Framework for Land Evaluation, published in FAO (1976), which establishes the guidelines and strategies for this evaluation, to achieve uniformity of all previous systems. Through the years, the FAO and its working groups have published a series of manuals and newsletters where they expose the strategies of land evaluation for dryland farming (FAO, 1983), silviculture (FAO, 1984), irrigated farming (FAO, 1985), forestry (FAO, 1990), and extensive grazing (FAO, 1991).

The growing and competitive demand of land for agricultural production and other purposes requires making decisions about the most beneficial use of land and, at the same time, about its conservation in the future (Zonneveld, 1989; Rossiter, 1996; Martin and Saha, 2009; Sonneveld *et al.*, 2010). Around the world, different land evaluation methods have been proposed and followed (Gómez *et al.*, 2010) (Table 1) with different approaches, but with a common goal: finding the perfect harmony between the type of land and its use by evaluating the requirements and limitations of each use of land

han propuesto y realizado diversos métodos para la evaluación de tierras (Gómez *et al.*, 2010) (Cuadro 1) con diferentes enfoques, pero con un objetivo común: encontrar la perfecta armonía entre el tipo de tierra y su uso mediante la evaluación de los requerimientos y limitaciones de cada clase de uso del suelo (Mokarram y Aminzadeh, 2010; Perucca y Kurtz, 2016). Así como la comparación de las características y propiedades que presentan los diferentes tipos de terrenos.

La mayoría de los enfoques, métodos y sistemas para la evaluación de tierras no considera adecuadamente los factores determinantes que los agricultores toman en cuenta para el establecimiento de un cultivo en cierta zona; esto es, no consideran el conocimiento local del paisaje. Además, muchos modelos se desarrollaron para un cultivo y zona en específico, y por ello puede ser inválido o poco práctico adecuarlos a otros cultivos o zonas.

El modelo Agrilocal considera las prácticas agrícolas locales, porque para evaluar las tierras maneja como parámetros las relaciones espaciales existentes entre la distribución del cultivo y diversos aspectos del territorio, las cuales reflejan las prácticas agrícolas locales. El modelo evalúa las condiciones adecuadas para los cultivos con base en una combinación de medidas de relevancia-preferencia-influencia, que las relaciones espaciales presentan en el sistema agrícola. A diferencia de los resultados de otros modelos, los obtenidos con el modelo Agrilocal no deben y no pueden ser usados como indicadores de los rendimientos o las ganancias del cultivo, en cambio, representan el grado de aptitud que puede tener el uso de una nueva superficie para propósitos agrícolas de acuerdo con el contexto local.

classification (Mokarram and Aminzadeh, 2010; Perucca and Kurtz, 2016). Also, by comparing the characteristics and properties of the different types of land.

Most of the approaches, methods, and systems for land evaluation do not properly consider the determining factors that the farmers do when establishing a crop in a specific area; namely, they do not consider the local knowledge of the landscape. Additionally, many models were developed for a specific crop and area, which may invalidate them or make them less practical for other crops or areas.

The Agrilocal model considers the local agricultural practices; thus, for land evaluations, it considers as parameters the existing spatial relations between the crop distribution and several land aspects, which reflect the local agricultural practices. This model evaluates the proper crop conditions based on a combination of relevance-preference-influence measures that the spatial relations present in the agricultural system. Unlike the results from other models, the Agrilocal model results must not and can not be used as indicators of the crop yield or profitability; instead, they represent the suitability of a new area for agricultural purposes according to the local context.

Thus, this study aimed to evaluate the land suitability for the avocado crop based on the local knowledge of the landscape in the RPT. We hypothesized that some of the socioeconomic and environmental factors; like road proximity and human settlements, land slope or inclination, altitude, and precipitation; that farmers of the RPT consider to

Cuadro 1. Métodos para la evaluación de tierras.
Table 1. Land evaluation methods.

Tipo	Métodos
Cualitativos	Land Capability (USDA, 1961); Esquema de evaluación de tierras de la FAO (FAO, 1976); Clasificación de tierra para usos con riego (USBR, 1953); Sistemas de tierras de Australia (Christian and Stewart, 1968); Soil Potential Rating (USDA, 1983); Clasificación de Suelos para la capacidad de fertilidad (Sánchez <i>et al.</i> , 1982); LESA (USDA, 1983); MICROLEIS (De la Rosa <i>et al.</i> , 2004); Andaland (Fernández-Boyano <i>et al.</i> , 2016).
Paramétricos	Índice Storie (Storie <i>et al.</i> , 1976); Índice de productividad (Riquier <i>et al.</i> , 1970); Agrilocal (Ramírez-Sánchez, 2009).
Cuantitativos	ALES (Rossiter <i>et al.</i> , 1995); WOFOST (Diepen <i>et al.</i> , 1989); CERES (Jones <i>et al.</i> , 1989); CROPSYST (Stöckle <i>et al.</i> , 1994); ASSOFU (Gallegos-Tavera <i>et al.</i> , 2014).

Así, el objetivo de este estudio fue evaluar la aptitud territorial para el cultivo del aguacate a partir del conocimiento local del paisaje en la RPT. La hipótesis fue que algunos factores socioeconómicos y ambientales, como la proximidad a caminos y a asentamientos humanos, la pendiente o inclinación del terreno, la altitud y la precipitación, y que los agricultores de la RPT consideran para determinar qué zonas son más adecuadas para el cultivo de aguacate, se encuentran en los patrones espaciales actuales e históricos de la distribución de este cultivo. Estos patrones pueden observarse en series temporales de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La RPT se ubica en el centro-occidente del estado de Michoacán, México ($19^{\circ} 17' 31''$ y $19^{\circ} 32' 38''$ N y $102^{\circ} 09' 04''$ y $102^{\circ} 26' 46''$ O), en parte de los municipios de Tancitaro, Nuevo Parangaricutiro, Peribán, Uruapan y Los Reyes, cubriendo una superficie de 67 456.75 ha (entre 1000 y 3840 m de altitud).

La evaluación de tierras para el cultivo de aguacate se basa en el modelo Agrilocal, el cual trabaja en función de la relevancia, preferencia e importancia de factores locales establecidos bajo los dos supuestos siguientes:

- 1) El conocimiento experto de los agricultores está contenido en el patrón espacial de las prácticas agrícolas, en cierto modo sostenible e implícito bajo condiciones ambientales y socioeconómicas locales, que favorecen o restringen el uso del territorio; y
- 2) Las prácticas agrícolas contienen patrones y relaciones espaciales descritos en funciones matemáticas de preferencia y determinados por el grado de influencia de los valores o pesos de cada relación, derivados de una distribución estadística entre los eventos geográficos que conforman el sistema agrícola, los parámetros del modelo y los patrones espaciales actuales o históricos o ambos.

Cabe destacar que las relaciones espaciales se pueden definir como las interacciones entre eventos espaciales que permiten identificar, describir, explicar, predecir y diseñar patrones de ocupación natural o el uso del territorio. En el contexto del estudio propuesto, las relaciones espaciales definen interacciones entre las zonas de cultivo de aguacate en la región y algunos elementos naturales, sociales y económicos que determinan el uso adecuado e inadecuado del territorio para este cultivo. Las relaciones espaciales

determine which areas are more suitable for avocado cultivation, can be observed in the current and historical spatial patterns of distribution of this crop. We can see these patterns in temporal series of satellite images and aerial photographs.

MATERIALS AND METHODS

Area of study

The RPT is located in the central-western area of the state of Michoacan, Mexico ($19^{\circ} 17' 31''$ and $19^{\circ} 32' 38''$ N, and $102^{\circ} 09' 04''$ and $102^{\circ} 26' 46''$ W), in the municipalities of Tancitaro, Nuevo Parangaricutiro, Periban, Uruapan, and Los Reyes, comprising an area of 67 456.75 ha (between 1000 and 3840 m of altitude).

The land evaluation for the avocado crop is based in the Agrilocal model, which considers the relevance, preference, and importance of the local factors established according to the following two assumptions:

- 1) The spatial pattern of agricultural practices contains the expert knowledge of the farmers, in a sustainable and implicit way under local environmental and socioeconomic conditions that favor or restrict the land use; and
- 2) The agricultural practices contain spatial patterns and relations, described preferably in mathematical functions and determined by the degree of influence of the values or weights of each relation, derived from a statistical distribution among the geographical events that comprise the agricultural system, the model parameters, and the current or historical, or both, spatial patterns.

Notably, spatial relations can be defined as the interactions between spatial events that allow to identify, describe, explain, predict, and design patterns of natural occupations or the use of the land. In the context of the proposed study, the spatial relations define the interactions between the avocado crop areas in the region and some natural, social, and economic elements that determine the proper and improper use of the land for this crop. The spatial relations to explore can be of the following types: Proximity, Orientation, Exposition, Adjacency, Inclusion, Coincidence, and Connectivity.

Agrilocal model construction

For the construction of the Agrilocal model, we independently obtained measures of relevance, preference, and influence of each of the spatial relation explored. The steps are described below.

a explorar pueden ser de alguno de los siguientes tipos: Proximidad, Orientación, Exposición, Adyacencia, Inclusión, Coincidencia y Conectividad.

Construcción del modelo Agrilocal

Para la construcción del modelo Agrilocal se obtienen por separado medidas de relevancia, preferencia e influencia de cada relación espacial explorada. Los pasos se describen a continuación.

Determinación de las relaciones espaciales a explorar como parámetros del modelo

Esta determinación implica una evaluación cualitativa en la decisión de usar cierto terreno para el cultivo que se obtiene directamente de la aplicación de entrevistas a los agricultores locales, o de manera indirecta al usar la diferencia entre la distribución espacial real del cultivo con algún parámetro ambiental o socioeconómico, y la distribución espacial aleatoria del cultivo, que considera el mismo número de hectáreas de la distribución espacial real, pero las distribuye de manera aleatoria sobre el territorio de interés con cada parámetro ambiental o socioeconómico analizado. Si una relación espacial no es relevante, su distribución estadística se aproximará a la del patrón aleatorio. Para determinar la relevancia de estas relaciones espaciales se realiza lo siguiente:

- 1) Lista de posibles relaciones. Su estructura se basa en eventos geográficos o parámetros de la zona de estudio, de los cuales se conoce o se infiere que pueden ser determinantes en la localización y extensión del cultivo.
- 2) Mapas de la relación de cada parámetro con respecto a la distribución actual del cultivo. Para conocer el valor de las relaciones de cada parámetro con el cultivo, se superponen los mapas de distribución de cada parámetro al mapa de distribución y cobertura actual del cultivo, de la forma siguiente (Ecuación 1):

$$REC = RE * CC \quad [1]$$

donde, *REC*: mapa de relación espacial y la cobertura del cultivo; *RE*: mapa de la distribución espacial del parámetro en cuestión; *CC*: mapa de la cobertura del cultivo.

- 3) Mapas de la relación de cada parámetro con respecto a la distribución aleatoria del cultivo. Los mapas se preparan usando el número de hectáreas de la distribución real del cultivo y distribuyendo este número de hectáreas en celdas de tamaño determinado ubicadas de forma aleatoria (con

Determination of the spatial relations to explore as model parameters

This determination implies a qualitative evaluation in the decision to use a specific land for the crop that is directly obtained from surveys to the local farmers, or indirectly by employing the difference between the current spatial distribution of the crop with an environmental or socioeconomic parameter, and the random spatial distribution of the crop that considers the same number of hectares of the current spatial distribution, but distributes them randomly in the land of interest with each analyzed environmental or socioeconomic parameter. If a spatial relation is irrelevant, its statistical distribution will approximate that of the random pattern. To determine the relevance of these spatial relations the following is done:

- 1) List of possible relations. Its structure is based on geographical events or parameters of the area of study, from which we know or infer that can be determinants in the crop location and extension.
- 2) Relation maps of each parameter based on the current crop distribution. To learn the value of the relations of each parameter with the crop, we overlap the distribution maps of each parameter with the distribution and current crop coverage maps, as follows (Equation 1):

$$REC = RE * CC \quad [1]$$

where, *REC*: spatial relations and crop coverage map; *RE*: spatial distribution of the parameter studied map; *CC*: crop coverage map.

- 3) Maps of the relation of each parameter with respect to the random crop distribution. We elaborate the maps with the number of hectares of the actual crop distribution and distributing this number of hectares in cells with determined size located randomly (with uniform distribution) in a map of the random crop distribution; then, we overlap each of the distributions maps of every parameter as follows (Equation 2):

$$RAMC = RE * RAM \quad [2]$$

where, *RAMC*: map resulting from the spatial relation and the random crop map; *RE*: map of the spatial distribution of the parameter studied; *RAM*: random crop distribution map.

- 3) Elimination of the size effect. Due to the existence of more land units within one category, than among others and vice-versa, we normalize the quantities by dividing the

distribución uniforme) en un mapa de distribución aleatoria del cultivo, para luego superponerlo a cada uno de los mapas de la distribución de cada parámetro, de la forma siguiente (Ecuación 2):

$$RAMC = RE * RAM \quad [2]$$

donde, *RAMC*: mapa resultado de relación espacial y el mapa aleatorio del cultivo; *RE*: mapa de la distribución espacial del parámetro en cuestión; *RAM*: mapa de la distribución aleatoria del cultivo.

- 4) Eliminación del efecto tamaño. Debido a la existencia de más unidades de territorio dentro de una clase, que dentro de otras y viceversa, las cantidades se normalizan al dividir el número de celdas de cada mapa de relación espacial, entre el número de celdas que caen dentro de cada intervalo del total del territorio, y multiplicar por el número de celdas en cada clase de la relación, de la forma siguiente (Ecuación 3):

$$SNF_i = NCIE_i \left(\frac{NCIE_i}{NCIOE_i} \right) \quad [3]$$

donde, *SNF_i*: frecuencia de la clase normalizada *i*; *NCIE_i*: número de celdas de la clase *i* dentro de la relación en cuestión; *NCIOE_i*: número de celdas de la clase *i* dentro y fuera de la relación en cuestión.

Determinación de la relevancia de los parámetros del modelo

Esto es, la comparación estadística de la frecuencia y distribución de valores en los mapas real y aleatorio de las relaciones parámetro-cultivo. Para conocer si las distribuciones resultan normales o no, se someten a una prueba de normalidad; se utilizan los estadísticos de sesgo y kurtosis, si los valores de uno o ambos estadísticos se encuentran fuera del intervalo -2 a $+2$, la distribución estadística de la relación parámetro-cultivo se considera no normal.

De acuerdo con los resultados de la prueba de normalidad se aplican pruebas de comparación de ambas distribuciones de las relaciones parámetro-cultivo (real y aleatoria), con los estadísticos paramétricos *t* (Student) y *F* (Fisher) si la distribución es normal en ambas distribuciones, o los estadísticos no paramétricos *W* (Wilcoxon) y *D* (Kolmogorov-Smirnov) si alguna de las dos distribuciones no es normal, para evaluar tendencia central y dispersión (o diferencia máxima entre distribuciones, en el caso de Kolmogorov-Smirnov), respectivamente.

number of cells in each spatial relation map by the number of cells that fall within each interval of the total land, and multiplying by the number of cells in each category of the relation as follows (Equation 3):

$$SNF_i = NCIE_i \left(\frac{NCIE_i}{NCIOE_i} \right) \quad [3]$$

where, *SNF_i*: frequency of the normalized category *i*; *NCIE_i*: number of cells in the category *i* within the relation studied; *NCIOE_i*: number of cells in the category *i* inside and outside the relation studied.

Determination of the relevance of the parameters of the model

Namely, the statistical comparison of the frequency and distribution of the values in the current and random maps of the parameter-crop relations. To determine if the distributions are normal or not, we realize a normality test; with bias and kurtosis statistics, if the values from one or both statistics are out of range (-2 to $+2$), the statistical distribution of the crop-parameter relation is considered non-normal.

Based on the normality test results, we apply comparison tests to both distributions of the parameter-crop relations (current and random), with *t* (Student) and *F* (Fisher) parametric statistics if the distribution is normal in both distributions, or *W* (Wilcoxon) and *D* (Kolmogorov-Smirnov) non-parametric statistics if one of the distributions is non-normal, to evaluate central distribution and dispersion (or maximum difference between distributions, in the case of Kolmogorov-Smirnov), respectively.

Supposedly, the parameter-crop relation pattern is strongly determined by the farmers' preference (based in their knowledge about the importance of the parameter and its occurrence in the territory where they decide the use of land); thus, it does not follow a random behavior. Under this assumption, a parameter is relevant for the model when it is established that the current and random distributions are significantly different ($\alpha=95\%$ or $p \leq 0.05$) in both or one of the two distribution comparison tests applied.

Determination of the preference categories in each parameter of the model. The mathematical function that establishes the preference degree (preferable, acceptable, and marginal) in the use of land for each parameter-crop relation determined relevant in the previous step, based on the categories with the most frequent values on the distribution of this relation. The procedure is as the following:

El patrón de la relación parámetro-cultivo se supone que está fuertemente determinado por la preferencia de los agricultores (basada en su conocimiento sobre la importancia del parámetro y su ocurrencia en el territorio en donde toman su decisión de uso del terreno), y por lo tanto no sigue un comportamiento aleatorio. Bajo esta suposición, un parámetro es relevante para el modelo cuando se establece que la distribución actual y la aleatoria son significativamente diferentes ($\alpha=95\%$ o $p\leq 0.05$) en las dos o una de las dos pruebas de comparación de distribuciones aplicadas.

Determinación de las clases de preferencia en cada parámetro del modelo. La función matemática que establece el grado preferencia (preferible, aceptable y marginal) en el uso del territorio para cada relación parámetro-cultivo que resultó relevante en la etapa anterior, de acuerdo con las clases con la mayor frecuencia de valores en la distribución de dicha relación. El procedimiento para su determinación es el siguiente:

- 1) Probabilidad empírica. El valor más alto de probabilidad (1.0) se asigna al valor más alto de frecuencia y se divide entre los demás valores para obtener la probabilidad en una escala de valores entre 0 y 1.
- 2) Ajuste de la función que mejor describe la relación entre los valores de probabilidad empírica y el valor intermedio de los intervalos de clases. Para este ajuste se escoge la función más simple que posea el coeficiente de determinación (R^2), ajustado por grados de libertad, más alto.
- 3) Cálculo de los valores para establecer tres clases de aptitud del territorio para el cultivo de aguacate. En este cálculo se establecen rangos para tres clases de aptitud (óptima, media y marginal), se adopta el criterio de mínima varianza al interior de cada clase y la máxima varianza entre clases, mediante el algoritmo de agrupamiento estadístico K-medias.
- 4) Determinación de la influencia de los parámetros del modelo. En esta determinación se asignan pesos a los parámetros del modelo para indicar el grado de influencia que en teoría cada uno posee en la decisión de usar el territorio para el cultivo de aguacate. La suposición inicial es que todas las relaciones espaciales tienen diferentes grados de influencia en la toma de decisiones local para la ampliación del cultivo. A mayor diferencia entre los valores de la distribución actual y los valores de la distribución aleatoria, mayor es la influencia de la relación. Esta diferencia se mide con la prueba estadística *Kolmogorov-Smirnov*, que calcula el valor de D entre las distribuciones real y aleatoria de cada relación, y los valores obtenidos se transforman en pesos normalizados (la suma de los pesos debe ser igual a 1) de la forma siguiente (Ecuación 4):

$$WR_i = D_i / \sum_{j=1}^n D_j, i = 1...n \quad [4]$$

- 1) Empirical probability. The highest probability value (1.0) is assigned to the highest frequency value and divided by the rest of the values to obtain the probability on a scale of values between 0 and 1.
- 2) Function adjustment that best describes the relation between the empirical probability values and the intermediate value of the intervals of the categories. For this adjustment we chose the simplest function with the highest determination coefficient (R^2), adjusted by the highest degree of freedom.
- 3) Calculation of the values to establish three categories of land suitability for the avocado cultivation. In this calculation we established intervals for three suitability categories (optimal, medium, and marginal), adopt the minimum-variance criterium within each category and the maximum-variance between categories, using the K-means clustering algorithm.
- 4) Determination of the influence of the model parameters. In this determination we assign weights to the model parameters to indicate the influence degree that, theoretically, each one possesses in the decision making of using the land for the cultivation of avocado. The initial supposition is that all the spatial relations have different degrees of influence in the local decision making for the crop expansion. The greater the difference between the current distribution values and the random distribution values, the greater the influence of the relation. We measure this difference with the Kolmogorov-Smirnov statistical test, that calculates the value of D between the current and random distributions of each relation, and the values obtained are transformed in normalized weights (the sum of the weights must be equal to 1) as follows (Equation 4):

$$WR_i = D_i / \sum_{j=1}^n D_j, i = 1...n \quad [4]$$

where, WR_i : relation i weight; D_i : maximum difference (Kolmogorov-Smirnov) between the accumulative current and random distribution of each relation i ; n : number of relations in the model.

With these weights the Agrilocal model is generated, weighted as follows:

$$LA = WR_i (fPR_i) + WR_{i+1} (fPR_{i+1}) + WR_{n-1} (fPR_{n-1}) + WR_n (fPR_n), i = 1...n \quad [5]$$

where, LA : land suitability based on the Agrilocal model; WR_i : relation i weight; PR_i : spatial relation in question; n : number of relations in the Agrilocal model.

donde, WR_i : peso de la relación i ; D_i : máxima diferencia (Kolmogorov-Smirnov) entre la distribución acumulativa real y la aleatoria de cada relación i ; n : número de relaciones en el modelo.

Con estos pesos se genera el modelo Agrilocal ponderado de la forma siguiente:

$$LA = WR_i(fPR_i) + WR_{i+1}(fPR_{i+1}) + WR_{n-1}(fPR_{n-1}) + WR_n(fPR_n), i = 1 \dots n \quad [5]$$

donde, LA : aptitud de tierras de acuerdo al modelo Agrilocal; WR_i : peso de la relación i ; PR_i : relación espacial en cuestión; n : número de relaciones en el modelo Agrilocal.

El modelo acepta opcionalmente la aplicación de encuestas a los agricultores locales para: 1) derivar los pesos, y 2) validar los obtenidos estadísticamente de los patrones de distribución del cultivo. Sin embargo, esto requiere un número relativamente alto de encuestas y que exista un control de la subjetividad en las respuestas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de tierras: aplicación del modelo Agrilocal

Para ejemplificar como se elabora un modelo Agrilocal (se usaron datos del año 2016) se tomó como base el cultivo de aguacate en la RPT. La selección de esta zona se debió a la necesidad de conocimiento del potencial de expansión del cultivo de aguacate, basado en los factores socioeconómicos y ambientales que ayudan o limitan el desarrollo del cultivo.

Determinación de las relaciones espaciales a explorar como parámetros del modelo

Después de analizar 17 relaciones espaciales se encontró que tres fueron no relevantes (temperatura mínima de enero, febrero y diciembre) y los demás resultaron relevantes (Cuadro 2).

En relación a la distribución estadística de las 17 relaciones analizadas, se obtuvieron diez relaciones con distribución normal, cinco con distribuciones no normales y dos con distribución normal y no normal. Dentro de las distribuciones normales se encontraron las relaciones espaciales no relevantes, por no ser estadísticamente significativas. Esto significa que la

The model accepts as an option the application of surveys to the local farmers to 1) obtain weights, and 2) validate the ones obtained statistically from the distribution patterns of the crop. However, this requires a relative high number of surveys and a control of subjectivity in the responses.

RESULTS AND DISCUSSION

Land evaluation: Agrilocal model application

To exemplify how to create an Agrilocal model (data from 2016), we considered the avocado cultivation in the RPT as a base. We chose this area because of the knowledge required about the expansion potential of the avocado crop, based on the socioeconomic and environmental factors that help or restrict crop development.

Determination of the spatial relations to explore as model parameters

After analyzing 17 spatial relations, we found that three were not relevant (minimum temperature in January, February, and December), and we determined the rest as relevant (Table 2).

Concerning the statistical distribution of the 17 relations analyzed, we obtained ten relations with normal distribution, five with non-normal distribution, and two with normal and non-normal distributions. Within the normal distributions, we found the non-relevant spatial relations, for not being statistically significant, which means that the avocado extension has a wide distribution in the different categories of each of these three non-relevant parameters.

Relevance determination of the model parameters

Specify the preference functions. In this step, we obtained the functions of the relevant relations; the non-relevant were not used to create the model. As an example, we present the functions obtained for parameters of the land altitude and proximity to human settlements. In the first example, the desirable altitude (where the values of estimated probability are $p \leq 0.5$) to carry out avocado cultivation is between 1900 and 2200 m; this corresponds with the altitudinal range in which the crop develops most effectively. In the case of the human settlements

Cuadro 2. Relaciones espaciales exploradas y relevantes para el cultivo de aguacate en la RPT.**Table 2.** Spatial relations explored and relevant to the avocado cultivations in the RPT.

Relación espacial [†]	Distribución Cultivo / Aleatoria	Relevancia a=95 %	Tipo de relación
Altitud	No-Normal/No-Normal	Relevante	Coincidencia
Temperatura mínima de enero	Normal/Normal	No relevante	Coincidencia
Cultivo anual	Normal/No-Normal	Relevante	Proximidad
Poblaciones	No-Normal/No-Normal	Relevante	Proximidad

[†]Por cuestión de espacio, en cuadros y figuras se muestran sólo algunos de los resultados. Los demás datos se pueden solicitar al autor para correspondencia. ❖ [†]Because of space, tables and figures only show a part of the results. The rest of the data can be requested to the author for correspondence.

cobertura de aguacate tiene una distribución amplia en las diferentes categorías de cada uno de estos tres parámetros no relevantes.

Determinación de la relevancia de los parámetros del modelo

Especificar las funciones de preferencia. En este paso se obtuvieron las funciones de las relaciones relevantes, ya que las no relevantes no se usaron en la elaboración del modelo. Como ejemplo, se muestran las funciones obtenidas para los parámetros altitud del terreno y proximidad a asentamientos humanos. En el primer ejemplo la altitud deseable (donde los valores de probabilidad estimada son $p \leq 0.5$) para realizar el cultivo de aguacate está entre 1900 y 2200 m; esto coincide con el intervalo altitudinal en el cual el cultivo se desarrolla de manera efectiva. En el caso del parámetro de proximidad a asentamientos humanos el rango deseable es de 0 a 1000 m de distancia, lo cual concuerda con la suposición de que entre más cercano esté el cultivo a las localidades, el beneficio es mayor debido a la reducción de gastos de transporte, de insumos para producción y de la producción misma (Figura 1).

Determinación de la influencia de los parámetros del modelo. En este paso se obtuvo que la relación con más influencia en el cultivo de aguacate fue la distancia a localidades con un peso de 0.1244, y le sigue en importancia la distancia a caminos con un peso de 0.1213 (Cuadro 3).

Una vez que se tienen los pesos de cada relación se genera el mapa de aptitud ponderada, como se describe a continuación.

proximity parameter, the desirable range is of 0 to 1000 m of distance, which corresponds with the supposition that the closer the crop is to the localities, the higher the benefit due to the reduction of transportation costs, inputs of production, and the production itself (Figure 1).

Determination of the influence of the model parameters. In this step, we observed that the relation with the most influence in the cultivation of avocado was the distance to localities with a weight of 0.1244, and the second in importance is the distance to roads, with a weight of 0.1213 (Table 3).

Once we determined the weight of every relation, we generate the weighted suitability map as follows.

Weighted suitability map

Here we used the general form of the weighted Agrilocal model, as indicated in Equation 6:

$$modeponde = ([canorm] * 0.11503715) + ([lluv30norm] * 0.09244053) + ([penorm] * 0.08627792) + ([prefcam] * 0.12132832) + ([prefepobla] * 0.12443929) + ([preforien] * 0.1078474) + ([preftwic] * 0.04977567) + ([pasnorm] * 0.09955134) + [tmax30] + [suelpeso30] \quad [6]$$

where, *prefcam07* = distance to roads; *canorm07* = distance to annual crops; *pasnorm07* = distance to grasslands; *tmax30* = maximum temperature; *preforient07* = hillside orientation; *penorm07* = slope; *preftwic07* = topographic wetness index; *lluv30norm07* = precipitation; *prefepobla07* = distance to localities; *suelnpeso30* = soil type.

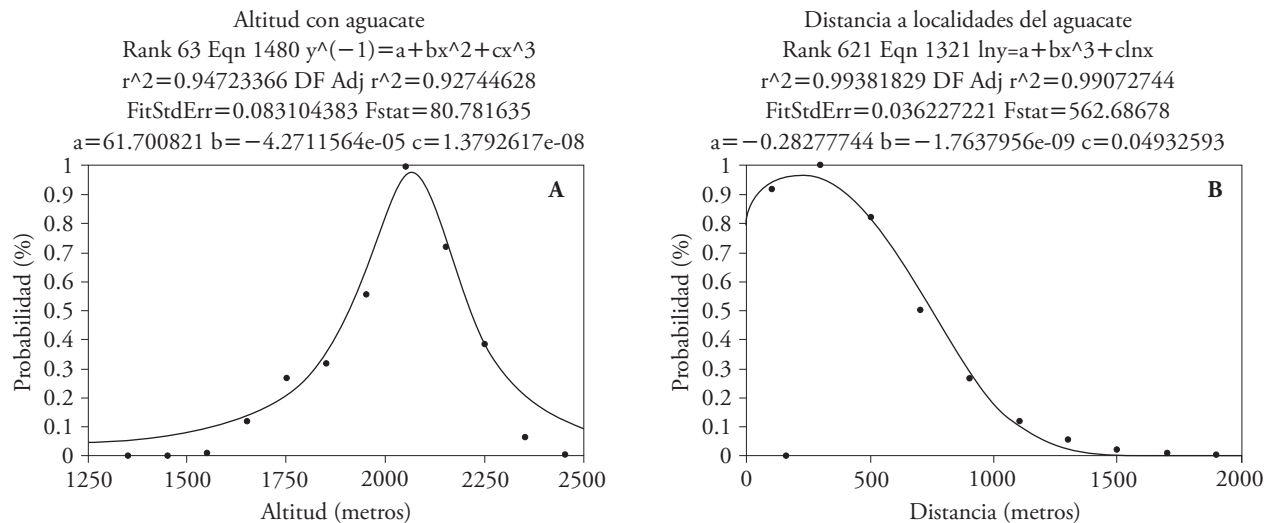


Figura 1. Funciones de preferencia de las relaciones espaciales. A: Altitud y B: Distancia a localidades.

Figure 1. Preference functions of the spatial relations. A: Altitude and B: Distance to localities.

Mapa de aptitud ponderada

Aquí se emplea la forma general del modelo Agrilocal ponderado indicada en la Ecuación 6:

$$\begin{aligned} modeponde = & ([canorm] * 0.11503715) + ([lluv30norm] \\ & * 0.09244053) + ([penorm] * 0.08627792) + ([prefcam] * \\ & 0.12132832) + ([prefepobla] * 0.12443929) + ([preforien \\ & te] * 0.1078474) + ([preftwic] * 0.04977567) + ([pasnorm] \\ & * 0.09955134) + [tmax30] + [suelnpeso30] \end{aligned}$$

[6]

donde, $prefcam07$ = distancia a caminos; $canorm07$ = distancia a cultivos anuales; $pasnorm07$ = distancia a pastizales; $tmax30$ = temperatura máxima; $preforient07$ = orientación de laderas; $penorn07$ = pendiente; $preftwic07$ = índice topográfico de humedad; $lluv30norm07$ = precipitación; $prefepobla07$ = distancia a localidades; $suelnpeso30$ = tipo de suelo.

Additionally, we classified the results of this model in five land suitability categories (Very high, High, Moderate, Low, and Very low), using an interval size of 0.2 of suitability. Thus, the High suitability category presented greater area in the region, 23 %, followed by the Low, Moderate, Very low, and Very high categories, with 21, 20, 19, and 15 % of the area of study, respectively.

In the model application results, the distribution of the different levels of land suitability is clearly influenced by the parameters with the higher weights, as logically expected. In particular, the proximities to roads and localities parameters are the most apparent effects, as well as minimum and maximum temperatures. The first ones determine that the most suitable areas are close to roads and human settlements, whereas the second ones determine that the less suitable areas are the ones with greater altitude, that corresponds to the RPT and its extension towards

Cuadro 3. Pesos de las relaciones espaciales para el cultivo de aguacate en la RPT.

Table 3. Weights of the spatial relations for avocado cultivation in the RPT.

Relación espacial	D [†]	Valor de P para D	Peso
Pendiente	0.4	0.00002	0.086
Precipitación	0.428	0.558	0.092
Cultivo anual	0.533	0.028	0.115
Localidades	0.576	0.0003	0.124

[†]Prueba estadística Kolmogorov-Smirnov. [‡]Kolmogorov-Smirnov statistical test.

Además, los resultados de este modelo se clasificaron en cinco clases de aptitud del territorio (Muy Alta, Alta, Moderada, Baja y Muy Baja), empleando un tamaño de intervalo de 0.2 de aptitud. Así, la clase de aptitud Alta presentó mayor superficie en la zona, 23 %, le siguen las clases Baja, Moderada, Muy Baja, y Muy Alta, con 21, 20, 19 y 15 % del área de estudio, respectivamente.

En los resultados de la aplicación del modelo se observa que la distribución de los diferentes niveles de aptitud territorial está claramente influenciada por los parámetros con mayor peso, como es lógico. En particular, el efecto más aparente es el de los parámetros de la proximidad a caminos y proximidad a localidades, así como los de las temperaturas mínimas y máximas. Los primeros determinan que las zonas de mayor aptitud se encuentren cercanas a caminos y poblaciones, mientras que los segundos determinan que las áreas de menor aptitud sean las zonas de mayor elevación correspondientes a la RPT y su extensión hacia la Meseta Purépecha, por ser zonas con temperaturas mínimas demasiado frías para el cultivo. Asimismo, se observa una zona de Baja y Muy Baja aptitud en el ángulo SE de la zona de estudio; esta corresponde a áreas con temperaturas máximas demasiado cálidas para el aguacate (Figura 2).

Además, la distribución de la cubierta actual de aguacate (2016) se comparó con la distribución de las clases de aptitud territorial, con 44 % de la superficie de aguacate en la clase de aptitud Alta, y 41% está dentro de la categoría de aptitud Muy Alta. Entonces, lo anterior, de acuerdo con las relaciones espaciales analizadas e incluidas en el modelo, significa que el cultivo del aguacate se encuentra en condiciones óptimas para su desarrollo (Cuadro 4).

Aplicación de encuestas

La aplicación de encuestas se hizo con el objetivo de validar los resultados de relevancia, preferencia e influencia obtenidos estadísticamente de las distribuciones del cultivo de aguacate.

Parámetros relevantes de acuerdo con los productores locales de aguacate

En total se aplicaron de 34 encuestas a los productores locales de aguacate (2016), y dentro de los entrevistados hay algunos ingenieros agrónomos, quienes

the Purepecha plateau, for being areas with too cold minimum temperatures for cultivation. Likewise, there is an area with Low and Very low suitability in the SE angle of the area of study; these correspond to areas with maximum temperatures too high for avocado (Figure 2).

Moreover, we compared the distribution of the current avocado extension (2016) with the distribution of the land suitability categories, with 44 % of the avocado area in the High suitability category, and 41 % within the Very high suitability category. Thus, the latter, based on the spatial relations analyzed and included in the model, indicates that the avocado crop is in optimal conditions for its development (Table 4).

Survey application

The survey application aimed to validate the relevant, preferent, and influent results statistically obtained from the avocado crop distributions.

Relevant parameters according to the local avocado producers

In total, we applied 34 surveys to the local avocado producers (2016), among the surveyed were some agronomy engineers, who contributed their point of view and experience regarding the cultivation of avocado in the area, which helped to develop four points of view: 1) the external technical part (Agrilocal model), 2) the local technical part (agronomy engineers of the area), 3) local producers of avocado (no professionals), and 4) literature specialized in the topic of avocado cultivation. These points of view, at the time of the comparison, were, if not identical, very similar, which reflects concordance between the four points of analysis, and validates the results of the Agrilocal model.

According to local farmers, all parameters are relevant for the cultivation of avocado, and in their experience and perception of the landscape, they mentioned one or another parameter. However, when processing the answers, the most relevant parameters for the avocado farmer were: altitude, wetness, type of soil, and amount of rain, those were mentioned in 100, 85, 79, and 79 % of all the surveys, respectively. The great relevance of the altitude parameter must be understood in

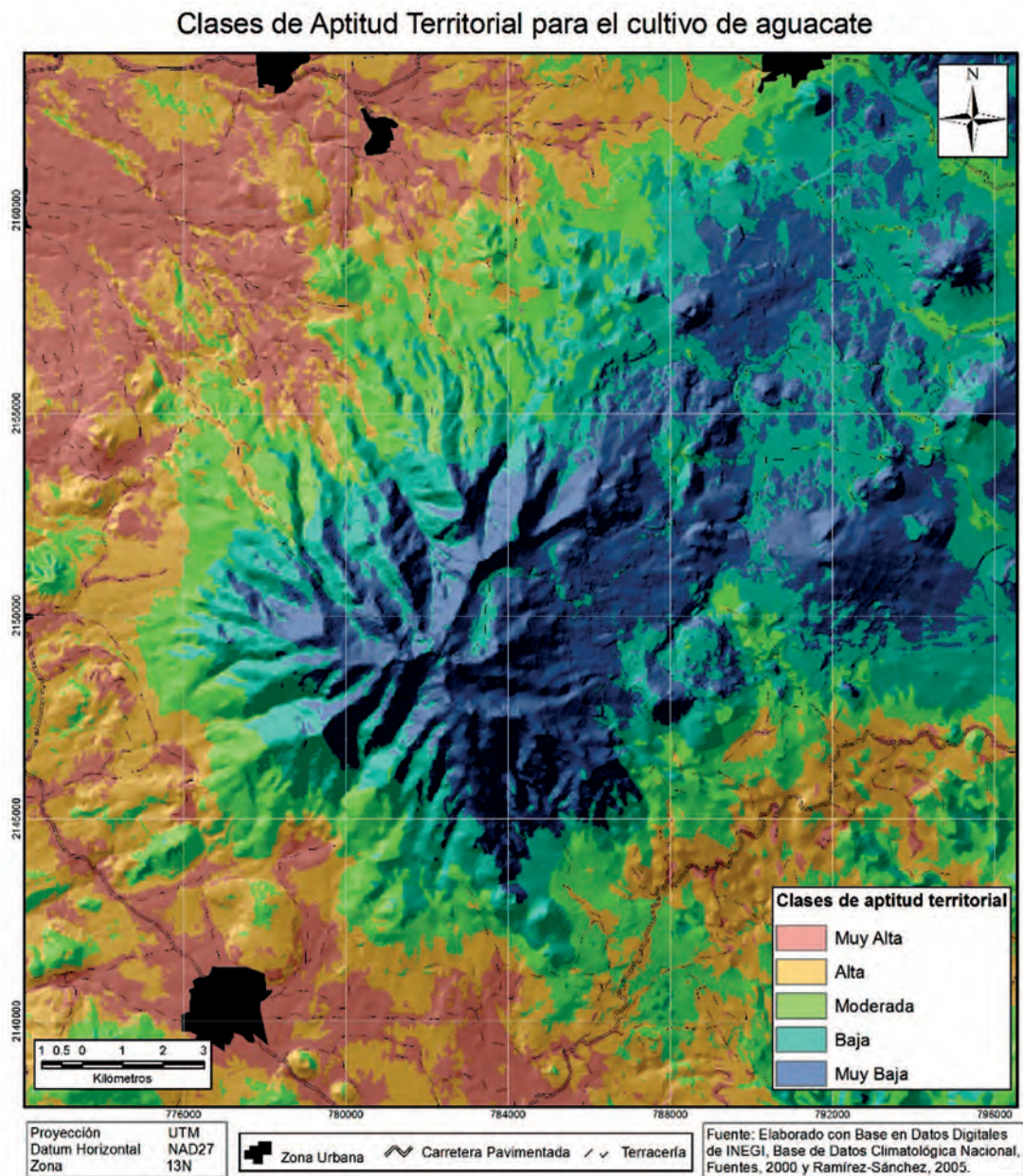


Figura 2. Modelo Agrilocal del cultivo del aguacate en la RPT.

Figure 2. Agrilocal model of avocado cultivation in the RPT.

vertieron su punto de vista y experiencia respecto al cultivo del aguacate en la zona y esto ayudó a tener cuatro puntos de vista: 1) la parte técnica externa (modelo Agrilocal), 2) la parte técnica local (ingenieros agrónomos de la zona), 3) productores locales de aguacate (no profesionales), y 4) literatura especializada en el tema del cultivo de aguacate. Estos puntos de vista, al momento de realizar la comparación, fueron, si no idénticos, muy similares entre sí, lo cual refleja

the context of minimum temperature. Thus, this variable is very relevant to the farmers not because of the altitude value itself, but because at higher altitudes, the minimum temperatures are colder, and this affects the good development of the crops due to the presence of frequent or intense, or both, frosts. Likewise, at lower altitudes, the maximum temperatures are warmer, which also affects the crop (Table 5).

Cuadro 4. Comparación entre la cubierta de aguacate (2016) y la aptitud territorial.

Table 4. Comparison of the avocado extension (2016) and the land suitability.

Clase [†]	VLP [‡]	SAE [§]	SCA [‖]	AG-CLA [‡]	AG-CU ^{††}
Muy Alta	0.8 - 1.0	10296.12	8934.11	86.77	41.64
Alta	0.6 - 0.8	15686.58	9587.43	61.11	44.68
Moderada	0.4 - 0.6	13606.14	2752.73	20.23	12.82
Baja	0.2 - 0.4	14634.87	181.23	1.238	0.844
Muy Baja	0.0 - 0.2	13233.02	0	0	0
Totales		67456.75	21455.52		100

[†]Aptitud territorial; [‡]Valores límite de probabilidad; [§]Superficie en el área de estudio (ha); [‖]Superficie de cultivo de aguacate (ha); [‡]Porcentaje de cultivo de aguacate con respecto a la superficie de la clase, esta columna representa la cantidad de superficie potencial disponible para cultivo de aguacate dentro de cada clase de aptitud en el territorio; ^{††}Porcentaje de cultivo de aguacate con respecto al total de la superficie del cultivo. ♦ [†]Land suitability; [‡]Probability limit values; [§]Surface in the area of study (ha); [‖]Area of avocado crop (ha); [‡]Percentage of avocado crop with respect to the category area, this column represents the quantity of potential area available for avocado cultivation within each suitability category; ^{††}Percentage of avocado crop with respect to the total cultivation area.

concordancia entre los cuatro puntos de análisis, lo cual valida los resultados del modelo Agrilocal.

De acuerdo con los agricultores locales, todos los parámetros son relevantes para el cultivo de aguacate, y en su experiencia y percepción muy particular del paisaje, mencionaban uno u otro parámetro. Sin embargo, al procesar las respuestas, los parámetros más relevantes para los agricultores de aguacate fueron: la altitud, la humedad, el tipo del suelo y la cantidad de lluvia, que se mencionaron en 100, 85, 79 y 79 % de todas las encuestas aplicadas, respectivamente. La gran relevancia del parámetro de altitud debe entenderse en el contexto de la temperatura mínima. Es decir, esta variable es muy relevante para los agricultores no por el valor de altitud mismo, sino porque a mayor altitud las temperaturas mínimas son más frías y esto causa que los cultivos no se desarrollen bien por la presencia de heladas frecuentes o intensas o ambas. De igual manera, a menor altitud, las temperaturas máximas son cada vez más cálidas, lo cual también es un inconveniente para el cultivo (Cuadro 5).

Preference of parametric values according to the local producers of avocado

We applied this second part of the survey to learn the preference degree; for each parameter, we presented a series of intervals or categories, from which the avocado producers considered some as more preferable for this crop. In each parameter, except grassland proximity, there is an interval or category that stands out from the rest, which means that the producers that sow avocado prefer it. For example, the category 'Humid' from the soil humidity parameter, is the most preferable for the producers of this crop (Figure 3).

Weight of the parameters according to the local producers of avocado

The final part of the survey consisted in assigning a "weight" to each parameter relevant to the surveyed. The variable with the highest weight was the altitude,

Cuadro 5. Relaciones espaciales relevantes en las encuestas y el modelo Agrilocal.

Table 5. Relevant spatial relations in the surveys and the Agrilocal model.

Relación espacial	Encuestas	Agrilocal
Altitud	Relevante	Relevante
Temperatura mínima de enero	Relevante	No Relevante
Pastizales	Relevante	Relevante
Poblaciones	Relevante	Relevante

Preferencia en los valores paramétricos de acuerdo con los productores locales de aguacate

Esta segunda parte de la encuesta se aplicó para conocer el grado de preferencia; para cada parámetro se presentó una serie de intervalos de valores o clases, de los cuales los productores de aguacate consideran algunos como más preferibles para la práctica de este cultivo. En cada parámetro, excepto el de la proximidad a pastizales, hay un intervalo o clase que resalta entre los demás, lo cual indica que esta clase presenta una mayor preferencia por los productores para sembrar aguacate. Por ejemplo, la clase ‘Húmedo’ del parámetro Humedad del suelo, es la más preferible para los productores de este cultivo (Figura 3).

Peso de los parámetros de acuerdo con los productores locales de aguacate

La parte final de la encuesta consistió en asignarle “peso” a cada parámetro que resultó relevante para los encuestados. La variable con el mayor peso fue la altitud, seguida por el tipo de suelo, humedad del suelo y la temperatura mínima, con pesos de 9.4, 9.1, 8, y 7.9, respectivamente. La escala usada para asignar peso a cada variable fue de 0 a 10, con 10 el valor más importancia y 0 el de menor importancia.

Además en la comparación entre los pesos de los parámetros obtenidos de las encuestas y los obtenidos del modelo Agrilocal, la relación con mayor peso para la primera fue la altitud y para la segunda fue la proximidad a localidades. Sin embargo, es necesario recordar que los agricultores usan la altitud como indicador de temperaturas máximas y mínimas, y que en el modelo Agrilocal se emplearon solo los datos de las temperaturas y no los de altitud para evitar redundancia en el modelo. El peso de la temperatura

followed by the type of soil, soil humidity, and minimum temperature, with weights of 9.4, 9.1, 8, and 7.9, respectively. The scale we used to assign a weight to each variable was from 0 to 10, 10 is the value of most importance and 0 the value of less importance.

Moreover, comparing the weights of the parameters obtained from the surveys and the ones from the Agrilocal model, we found that the relation with the highest weight in the surveys was the altitude, and the proximity to localities had the highest weight in the Agrilocal model. However, it is important to remember that farmer use the altitude as an indicator of maximum and minimum temperature, and that in the Agrilocal model we only used the temperature data, not the altitude values to avoid redundancies in the model. The temperature weight was important in the final suitability model used in this study.

In the surveys we observed that the relation of the spatial crop distribution with “soil” is the second most important. But, it is important to point out that the producers indicated that the type of soil is essential for establishing a new avocado cultivation area, but in the area of study this was not the case, because there is a local type of soil that the producers call “Topuri” (Andosol), that is extensively distributed in the RPT and is very favorable for this crop (Table 6).

The Agrilocal model indicates that the areas with suitability categories Very High and High for avocado cultivation are 87 and 62 % occupied, respectively. Shortage and degradation of the areas with high potential, and other factors like uncontrolled logging, the continuous growth of human settlements, and the occupation of other fruit trees (peach, pear, apple), cause a continuous deterioration of the natural resources in the RPT. If we fail to implement adequate mitigation measures for this situation,

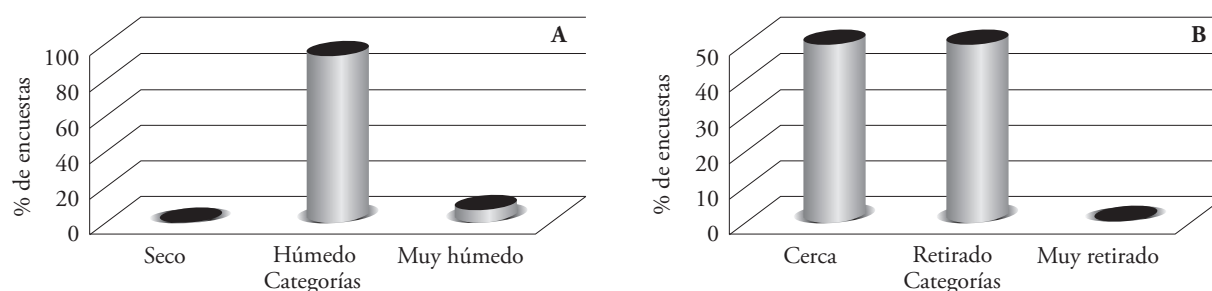


Figura 3. Grados de preferencia de los parámetros de acuerdo a los agricultores locales. A: Humedad del suelo y B: Cercanía a Pastizales.
Figure 3. Preference of the parameters according to the local farmers. A: Soil humidity and B: proximity to grasslands.

fue importante en el modelo final de aptitud usado en este estudio.

En las encuestas se observó que la relación de la distribución espacial del cultivo, con “suelo” es la segunda en cuanto a peso. Pero es importante mencionar que los productores indicaron que el tipo de suelo es importante en el establecimiento de una nueva zona para el cultivo del aguacate, pero en la zona de estudio este no fue el caso, porque hay un tipo de suelo local que los productores llaman “Topuri” (Andosol), de distribución extensa en la RPT y es muy favorable para este cultivo (Cuadro 6).

El modelo Agrilocal permitió observar que las superficies con clases de aptitud Muy Alta y Alta para el cultivo de aguacate, están ocupadas en 87 y 62 % respectivamente. La escasez y la degradación de zonas con alto potencial, y otros factores como la tala inmoderada de bosques, el crecimiento continuo de los asentamientos humanos y la ocupación de otros frutales (durazno, pera, manzana), propician un continuo deterioro de los recursos naturales en la RPT. De no tomar medidas adecuadas para mitigar esta situación, el cultivo de aguacate podría colapsar. Muestra de ello es la demanda hídrica alta por el cultivo de aguacate ($536\,570\text{ L ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$), lo cual ocasiona que la disponibilidad del recurso hídrico decrezca de un año a otro (Fuentes, 2000). Además, la distribución actual del cultivo está determinada por un criterio de mercado, estrictamente económico, para obtener mayores ganancias, y se realiza en zonas de baja aptitud territorial, sin que esto necesariamente indique que el cultivo en dichas áreas sea sostenible a largo plazo, ambiental o económicamente.

Si bien los resultados obtenidos con el modelo Agrilocal son aceptables, se debe tener en cuenta que el modelo es susceptible a la cantidad de variables usadas en el análisis. Además, el cambio de escala o el tamaño del área de estudio pueden causar que los resultados

avocado cultivation could collapse. Proof of this is the high hydric demand by the avocado crop ($536\,570\text{ L ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$), which decreases the availability of this water resource from one year to the next (Fuentes, 2000). Also, the current crop distribution is determined by a market criterium, strictly economic, to obtain more significant profits, and this happens in areas with low land suitability, without this being necessarily an indication that the cultivation in these areas is sustainable in the long run, environmentally or economically.

Even though the results from the Agrilocal model are acceptable, we must take into consideration that the model is susceptible to the number of variables used in the analysis. Besides, changes in the scale or size of the area of study can trigger different model results, and the quality of the results is directly related to the quality of the inputs used in the model elaboration.

CONCLUSIONS

In the results from the Agrilocal model stands out a proper selection of spatial relations for the analysis. The proof is that of the 17 spatial relations, 14 were relevant. The ones with the highest statistical weight were proximity to localities and proximity to annual crops. The first relation represents less investment for transportation and packaging of avocado; the second one provides a greater possibility to establish new cultivation areas, with logging being necessary.

Based on the model, 75 % of the avocado cultivation areas are in regions with optimal land suitability, and this crop distributions has been at the expense of the loss of forest areas; thus, the model would have to include environmental protection considerations that reduce or limit, or both, the land suitability.

Cuadro 6. Pesos de las relaciones espaciales según las encuestas y según el modelo Agrilocal.

Table 6. Weights of the spatial relations according to the surveys and the Agrilocal model.

Relación espacial	Encuestas	Agrilocal
Pendiente	0.06	0.086
Precipitación	0.07	0.092
Pastizales	0.05	0.099
Poblaciones	0.07	0.124

obtenidos del modelo sean diferentes, y la calidad de los resultados obtenidos tiene relación directa con la calidad de los insumos empleados en la elaboración del modelo.

CONCLUSIONES

En los resultados del modelo Agrilocal destaca una adecuada selección de relaciones espaciales para realizar el análisis. La prueba es que, de las 17 relaciones espaciales, 14 fueron relevantes. Las de mayor peso estadístico fueron; cercanía a localidades y cercanía a cultivos anuales. La primera representa a los agricultores una menor inversión para el transporte y empaque del aguacate; y la segunda les brinda una mayor posibilidad de establecer nuevas áreas del cultivo, sin necesidad de talar el bosque.

De acuerdo con el modelo, 75 % de las zonas de cultivo de aguacate están en zonas con aptitud territorial óptima, y esta distribución del cultivo ha sido a costa de la pérdida de zonas forestales, por lo cual el modelo tendría que incluir consideraciones de protección al medio ambiente que actúen como reductores o limitantes o ambos, de la aptitud del territorio.

El éxito del modelo Agrilocal se basa en su capacidad para inferir prácticas agrícolas preferibles, aceptables o deseables a partir de los patrones espaciales del cultivo de aguacate, lo cual significa que, en términos de ordenamiento territorial, los agricultores de la RPT conocen y manejan su territorio de la mejor manera posible. Otros modelos usan un marco espacial pero basan su utilidad en las propiedades de los eventos que ocurren en el espacio, en lugar de hacerlo en las relaciones espaciales de dichos eventos.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la beca otorgada para el financiamiento de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Akinci H, A. Y., Özalp, and M. Özalp. 2017. Investigating impacts of large dams on agricultural lands and determining alternative arable areas using GIS and AHP in Artvin, Turkey. *Selc. Univ. Jour. Engin. Scien. Techno.* 5: 83-95.
- Burgos A., C. Anaya, y G. Cuevas. 2012. Impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el estado de Michoacán: Definición de una Tipología de Productores,

The success of the Agrilocal model is based in its capacity to infer preferable, acceptable, or desirable agricultural practices, from spatial patterns of the avocado crop, which means that, in terms of territorial ordering, farmers of the RPT know and exploit their land the best way possible. Other models use a spatial framework, but they base their utility in the properties of the events that take place in the space, instead of basing it in the spatial relations of such events.

—End of the English version—



- Etapa II. Informe final, Fundación Produce Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Morelia, Michoacán. 125 p.
- Christian C. S., and G. A. Stewart. 1968. Methodology of integrated surveys. *In*: Rey, P. (ed). Aerial surveys and integrated studies. Proc. Toulouse Conf. 1964: UNESCO, Paris. pp: 233-280.
- CONAZA (Comisión Nacional de Zonas Áridas). 1994. Conceptos y criterios Ecológicos. Plan de Acción para Combatir la Desertificación en México (PACDMÉXICO) SEDESOL/FAO. México, D. F. 160 p.
- De la Rosa, D., F. Mayol, E. Díaz-Pereira, M. Fernández, and D. de la Rosa Jr. 2004. A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection with special reference to the Mediterranean region. *Environ. Modell. Softw.* 19: 929-942.
- Diepen C. V., J. Wolf, H. V. Keulen, and C. Rappoldt. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use Manage.* 5: 16-24.
- Elaalem M., A. Comber and P. Fisher. 2010. Land evaluation techniques comparing fuzzy AHP with TOPSIS methods. *In*: 13th AGILE international conference on geographic information science pp: 1-8. https://agile-online.org/conference_paper/cds/agile_2010/shortpapers_pdf/120_doc.pdf (Consulta: diciembre 2018).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1976. A framework for land evaluation. *Soils Bulletin* 32. FAO, Roma. 79 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1983. Directivas: Evaluación de Tierras para la Agricultura en Secano. *Boletín de Suelos* 52. FAO, Roma. 237 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1984. Guidelines: land evaluation for forestry. *Soils Bulletin* 48. FAO, Roma. 123 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1985. Directivas: Evaluación de Tierras para la Agricultura de Regadío. *Boletín de Suelos* 55. FAO, Roma. 243 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1990. Directivas: Evaluación de Tierras para Usos Forestales. *Boletín de Montes* 48. FAO, Roma. 106 p.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1991. Guidelines: land evaluation for extensive grazing. Soils Bulletin 58. FAO, Roma. 158 p.
- Fernandez-Boyano M., D. Tabernero-Perez, S. Alonso-Herrero, J. M. Perez-Alvarez, F. J. Blanco-Velazquez, M. Anaya-Romero, and J. E. Fernandez-Luque. 2016. Developing the prototype AndaLAND for agriculture soil and water assessment in climate change scenarios. Span. J. Soil Sci. 6: 21-36.
- Fuentes, J., J. J. A. 2000. Cuencas y áreas naturales protegidas: El manejo integrado de los recursos naturales en el Pico de Tancítaro, Michoacán. Gac. Ecol. 64: 33-46.
- Gallegos-Tavera Á., F. Bautista y O. Álvarez. 2014. Software ASSOFT para la evaluación de las funciones ambientales de los suelos. Rev. Chap. Ser. Cien. Forest. Amb. XX: 237-249. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2012.11.060.
- Garibay O. G., y G. Bocco. 2000. Legislación Ambiental, Áreas Protegidas y Manejo de Recursos en Zonas Indígenas Forestales. El caso de la Microregión del Pico de Tancítaro, Michoacán. Informe Técnico Final. PROFEPA-SEMARNAP. México 247 p.
- Gómez R. C., A. T. Fernández, J. L. Martínez, P. C. Iniguez, B. Villar, R. M.G. Sánchez, y J. I. C. Flores. 2010. Evaluación automatizada de tierras para el cultivo de ajonjolí en relevo a maíz. Rev. Mex. de Cien. Agrí. 1: 2119-131. DOI: 10.3232/SJSS.2016.V6.N1.03.
- Jones C. A., J. R. Kinir, and P. T. Dyke. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press. College Station, Texas. 194 p.
- Maddahi Z., A. Jalalian, M. M. K. Zarkesh, and N. Honarjo. 2014. Land suitability analysis for rice cultivation using multi criteria evaluation approach and GIS. Eur. J. Exp. Biol. 4: 639-648.
- Martin D., and S. K. Saha. 2009. Land evaluation by integrating remote sensing and GIS for cropping system analysis in a watershed. Curr. Sci. 96: 569-575.
- Martínez-Vega J., y R. Romero-Calcerrada. 2012. Evaluación de la ocupación del suelo con un sistema experto de evaluación de tierras y un SIG en la Zona de Especial Protección para las Aves "Encinares de los ríos Alberche y Cofio", Madrid. Est. Geog. 73: 551-580. DOI: 10.3989/estgeogr.201219.
- Mayorga J. O. 2001. Aplicación del sistema automatizado para la evaluación de tierras. Ing. Reg. 1: 29-32.
- Mokarram M., and F. Aminzadeh. 2010. GIS-based multicriteria land suitability evaluation using ordered weight averaging with fuzzy quantifier: a case study in Shavur Plain, Iran. The Intern. Arc. Phot. Rem. Sen. Spat. Infor. Sci. 38: 508-512.
- Perevochtchikova M., y A. M. Ochoa. 2012. Avances y limitantes del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos en México, 2003-2009. Rev. Mex. Cien. Forest. 3: 89-112.
- Perucca S. C., and D. B. Kurtz. 2016. Evaluación de tierras para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el noroeste de la provincia de Corrientes, Argentina. Agrotecnia. 24: 11-16.
- Plan Nacional de Desarrollo. 2012. URL: https://www.snig.mx/contenidos/espanol/normatividad/MarcoJuridico/PND_2013-2018.pdf (Consulta: Enero 2019).
- Riquier J., D. L. Bramao, and I. L. Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. FAO Aglters. 70: 6.
- Rossiter D. G., A. Jiménez, y A. Van. 1995. Sistema Automatizado para la Evaluación de Tierras, ALES. Manual para Usuarios. Versión 4.5 en español. Cornell University, Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences. Ithaca, NY. USA 16 p.
- Rossiter D. G. 1996. A theoretical framework for land evaluation. Geoderma 72: 165-190.
- Sánchez, P. A., W. Couto, and S. W. Buol. 1982. The fertility capability soil classification system: interpretation, applicability and modification. Geoderma 27: 283-309.
- Storie, R. E. 1976. Storie index soil rating (revised). Special Publication Division of Agricultural Science, University of California, Berkeley. 3032: 1-4.
- Sonneveld M. P.W., M. J. D. Hack-ten Broeke, C. A. van Diepen, and H. L. Boogaard. 2010. Thirty years of systematic land evaluation in the Netherlands. Geoderma 156: 84-92. DOI:10.1016/j.geoderma.2010.02.023.
- Stöckle, C.O., S. Martin, and G.S. Campbell. 1994. CropSyst, a cropping systems model: Water/Nitrogen budgets and crop yield. Agric. Syst. 46: 335-359.
- USBR (United States Bureau of Reclamation). 1953. Bureau of Reclamation Manual. Vol V. Irrigated Land Use, Part. 2. Land Classification. US Dept. Interior, Washington, DC. 132 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1961. Soil Conservation Service. Land Capability Classification. Agricultural Handbook 210. Washington. D. C. 21 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1983. National Agricultural Land Evaluation and Site Assessment Handbook, Government Printing Office. Washington D. C. 95 p.
- Van Berkel D. B., and P. H. Verburg. 2014. Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. Ecol. Ind. 37: 163-174.
- Zonneveld I. S. 1989. The land unit a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. Land. Ecol. 3: 67-86.

