

Determinación de la aptitud territorial de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán mediante evaluación multicriterio

Determination of territorial suitability for the production of pecan nuts in the province of Catamarca through multicriteria evaluation

Florencia Cecilia Trabichet

Ingeniera Agrónoma. Becaria doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Luján. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INIGEO UNLu-CONICET). Ruta 5 y Avenida Constitución - (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina, flortrabichet@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5886-6208>

Recibido: 17 de marzo 2022 || Aprobado: 11 de agosto 2022
DOI: <https://doi.org/10.37838/unicen/est.32-129>

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo, caracterizar la aptitud climática de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán, en función de tres variables climáticas y tres restricciones territoriales, a través de la técnica evaluación multicriterio (EMC), utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se utilizaron como fuentes de datos las variables BIO5, BIO6 y BIO12 del modelo *WorldClim* y las restricciones Ley de bosques, centros poblados y áreas protegidas. Se realizó una combinación lineal ponderada (WLC) de las capas y se obtuvo el mapa final de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca. La metodología aplicada permitió determinar que la provincia de Catamarca cuenta con aproximadamente un 19% de tierras aptas para la producción de nogal pecán.

Palabras clave: Lógica difusa; Evaluación multicriterio; Pecán; Evaluación de tierras; Sistemas de información geográfica

Abstract

This work aims to characterize the province of Catamarca's climatic suitability for nuts pecan production based on three climatic variables and three legal restrictions through the multi-criteria evaluation technique (EMC) using Geographic Information Systems (GIS). The variables BIO5, BIO6, and BIO12 of the *WorldClim* model and the legal restrictions Law of Forests, Populated Centers, and National Parks were used as data sources. A weighted linear combination (WLC) of the layers was performed, and the final suitability map for pecan walnut production in the province of Catamarca was obtained. The methodology applied allowed us to determine that the province of Catamarca has approximately 19% of land suitable for the production of pecan walnut.

Key words: Fuzzy logic; Multi-criteria evaluation; Pecan; Land evaluation; Geographic information systems

Cita sugerida: Trabichet, F. C. (2022). Determinación de la aptitud territorial de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán mediante evaluación multicriterio. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, (32), 129. <https://doi.org/10.37838/unicen/est.32-129>



Este trabajo está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Introducción

La evaluación de tierras es un proceso clave para la planificación de uso de las mismas (Yu et al., 2011), y se emplea para definir (Akıncı et al., 2013) y medir el grado de adaptabilidad para ciertos tipos de usos (El Baroudy, 2016) con el objetivo de lograr un manejo eficiente de las mismas (Montgomery et al., 2016). A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos enfoques de evaluación de tierras y cada uno tiene un procedimiento metodológico específico (Walke et al., 2012), el más difundido es el propuesto por FAO (1976) que consta de cinco clases de aptitud: muy apto, moderadamente apto, marginalmente apto, no apto temporalmente, y permanentemente no apto (FAO, 1976; 2007).

En general, para este tipo de análisis, se tienen en cuenta tanto los requisitos del cultivo como las características de la tierra. Si bien no existe una estandarización en la elección de los criterios a utilizar en este tipo de trabajos, las condiciones climáticas, la topografía y las propiedades de los suelos son ampliamente utilizadas (Akıncı et al., 2013; Walke et al., 2012).

El análisis de la aptitud de las tierras basado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es una línea de análisis ampliamente utilizada para la planificación del territorio (Romano et al., 2015) al utilizar una herramienta valiosa para almacenar, recuperar y procesar una gran cantidad de datos en forma cuantitativa, necesarios para calcular y asignar los índices de calidad diferentes para la aptitud de la tierra (El Baroudy, 2016). En este tipo de estudios, los SIG y las herramientas estadísticas geoespaciales, se utilizan para evaluar las unidades de tierra y presentar los resultados en forma de mapas de aptitud (Walke et al., 2012). En todos los casos, se parte de la premisa que, una determinada área, se subdivide en un conjunto de unidades básicas de observaciones y que, el problema de la aptitud del uso del suelo, implica la evaluación y la clasificación de esas unidades de área en función de su idoneidad para una actividad en particular (Malczewski, 2006).

Debido a que, generalmente, existen una gran cantidad de factores involucrados en la toma de decisiones, el análisis de aptitud de tierras puede definirse como un enfoque de evaluación multicriterio (EMC) (Reshmidevi et al., 2009), el cual consta de un procedimiento paso a paso que analiza la importancia relativa de diferentes opciones, combinando un conjunto de criterios cuantitativos y cualitativos (Akpoti et al., 2019).

El análisis de aptitud de tierras es un proceso que generalmente consta de cinco pasos: (1) diseñar el proceso de decisión en términos de cultivos objetivo; (2) estructurar el modelo EMC mediante la identificación de los requisitos ambientales de los cultivos; (3) seleccionar las funciones de estandarización espacial y determinar la relación cuantitativa entre cada factor ambiental considerado y la productividad potencial del cultivo objetivo considerado; (4) agregación de desempeños parciales mediante el cálculo de una clase de idoneidad o una puntuación para un solo factor para cada unidad de evaluación; y (5) combinación de las clases (por ejemplo, regla máxima / mínima) o puntuaciones (por ejemplo, combinación lineal ponderada) de todos los factores considerados y análisis de resultados y recomendaciones. (Akpoti et al., 2019, p. 174)

Dado que, los mapas de las variables que se emplean en la EMC poseen diferentes escalas de medida, es necesario que los valores contenidos en los mapas de criterios sean estandarizados o transformados a unidades comparables (Malczewski, 1999). Para la estandarización de las variables tenidas en cuenta en cada estudio, pueden utilizarse varios métodos, entre ellos el método difuso, mediante el cual, los valores cuantitativos de los parámetros ambientales se convierten en variables lingüísticas de orden adecuado o no adecuado mediante funciones de pertenencia. Durante este proceso, todos los valores de los factores se asignan a una escala común (es decir, valores de 0 a 1) (Feng et al., 2017).

El método difuso ha sido ampliamente adoptado en el análisis de aptitud de tierras (Akpoti et al., 2019). Este enfoque de función de membresías *fuzzy*, permite realizar una

estandarización, generando mapas-criterio que representan las transiciones graduales del espacio (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003). Los conjuntos *fuzzy* son agrupaciones sin límites tajantes, donde la transición entre la pertenencia y la no pertenencia de un elemento en el conjunto, es gradual (Eastman, 1999; Malczewski, 1999), lo cual permite que los elementos pertenezcan parcialmente a múltiples conjuntos. De este modo, la lógica *fuzzy* es útil para describir la transición de clases en el mundo real (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2010). En el caso en que se utilicen mapas de restricciones, la estandarización se realiza de acuerdo a la lógica booleana, llevando los valores de las unidades espaciales a dos posibilidades: 0 (no apto) o 1 (apto) (Buzai y Baxendale, 2011).

El cultivo de nogal pecán (*Carya illinoiensesis*) se adapta muy bien a variadas condiciones ambientales (Zhang et al., 2015) y en Argentina, existen aproximadamente 8.000 hectáreas implantadas (PROSAP-UCAR, 2015). Gómez y Cruzate (2007) utilizaron los mapas de suelos de Argentina en escalas 1:500.000 y 1:1.000.000 (SAGyP-INTA, 1990), y los regímenes de humedad y de temperatura, para determinar la aptitud de los suelos argentinos para la producción de nogal pecán, teniendo en cuenta los requerimientos del cultivo definidos por Herrera (1999). Los resultados obtenidos han permitido la delimitación de regiones con diferentes grados de aptitud para la producción de nuez pecán, en función de los requerimientos biológico-productivos de la especie, y esta información sirvió de base para la preselección de zonas en las cuales se puede producir pecán a nivel nacional, dentro de las cuales se localiza la provincia de Catamarca.

El presente trabajo tiene como objetivo, caracterizar la aptitud climática de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán, en función de las variables temperatura mínima del mes más frío, temperatura máxima del mes más cálido y precipitaciones anuales, aplicando restricciones territoriales mediante el uso de SIG, con la finalidad de generar una herramienta para la planificación espacial de la producción de nuez pecán.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La Provincia de Catamarca está ubicada en la región noroeste de la República Argentina (figura 1) entre los 25°12' y 30°04' de Latitud Sur y entre los 69°03' y 64°58' de Longitud Oeste. Su extensión es de 102.602 km² y solo el 22% de esta superficie están constituidos por valles y llanuras, siendo el resto montañoso y poco apto para la actividad agropecuaria (Núñez Aguilar y Álvarez de Toledo, 2004).

La mayor parte de la provincia es de clima árido y semiárido. Está surcada por cordones montañosos, que se ubican en sentido norte-sur y constituyen una barrera para el paso de los vientos húmedos provenientes del este. Ello provoca la disminución de las precipitaciones en sentido este-oeste. Los vientos húmedos del Pacífico son interceptados por la Cordillera de Los Andes y debido a ello no existen cursos de agua caudalosos.

Tiene un clima templado continental con una precipitación media que varía entre los 400 y 500 mm anuales en el este, disminuyendo hacia el oeste a menos de 150 mm en la Puna cordillerana, donde el déficit hídrico es compensado por las precipitaciones níveas (Cabrera, 1971; Núñez Aguilar y Álvarez de Toledo, 2004).

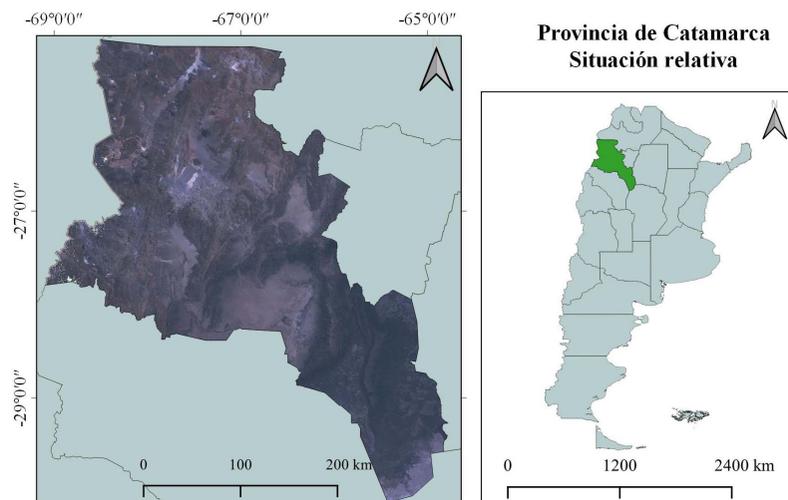


Figura 1. Provincia de Catamarca dentro de la República Argentina
 Fuente: elaboración personal. Imagen de fondo Landsat 5 composición color natural (RGB: 321) obtenida de *Google Engine*. Mosaico libre de nubes periodo enero a diciembre de 2010. Sistema de referencia: EPGS: 4326, WSG84

Software

Para todos los procesos en formato ráster se utilizó el programa IDRISI Selva desarrollado por *Clark University*, mientras que, para la realización de las salidas cartográficas se utilizó QGIS 3.16.8.

Fuentes de datos y modelado cartográfico

Mapas de factores climáticos:

Para el modelado de los mapas de factores climáticos, se utilizó la base de datos del modelo *WorldClim* (www.worldclim.org), el cual es un repositorio de acceso abierto y libre, que permite la descarga de 19 variables climáticas, a diferentes resoluciones espaciales y en diferentes formatos ráster (Varela et al., 2015).

Se tuvieron en cuenta las variables BIO5, BIO6 y BIO12 que corresponden a la temperatura máxima del mes más cálido, la temperatura mínima del mes más frío y las precipitaciones anuales, respectivamente (promedios históricos para el periodo 1970-2000). Estas capas cuentan con una resolución espacial de 30 segundos (0,93km x 0,93km en el Ecuador) y un sistema de referencia WGS84: EPSG2346; los datos de temperaturas se presentan en grados Celsius (°C) y las precipitaciones anuales en milímetros (mm). También se utilizó la capa vectorial (polígono) de la provincia de Catamarca (IGN, 2018) para recortar las capas de variables climáticas según los límites del área de estudio.

Se realizó una estandarización por lógica *fuzzy* de las capas de las variables climáticas utilizando el módulo *FUZZY* del *Software* IDRISI. Se aplicó la función sigmoidea simétrica, la cual consta de cuatro puntos de inflexión: “a”, “b”, “c” y “d”. Por debajo de “a” todos los valores de X toman aptitud 0; entre “a” y “b”, aumentan de 0 a 255; a partir de “b” hasta “c”, toman valor 255; entre “c” y “d”, disminuyen de 255 a 0 y; por encima de “d”, todos los X toman valor 0.

Se aplicó la función sigmoidea simétrica de acuerdo a los puntos de inflexión que se indican en el cuadro 1 para cada una de las variables.

	Tmax mes más cálido (°C)	Tmin mes más frío (°C)	PP anuales (mm)
a	18,3	0,6	760
b	23,9	7	1000
c	27	7	1300
d	41	10	2010

Cuadro 1. Puntos de inflexión para la estandarización *fuzzy* de las variables climáticas
Fuente: elaboración personal

Los criterios para determinar los valores asignados para los cuatro puntos de inflexión para cada una de las capas de variables se explican a continuación:

≈ Temperatura mínima del mes más frío (Tmin): Sparks (1997) señala que, por debajo de los 0,6°C se produce daño por frío para el cultivo de pecán, por lo cual fue seleccionado como mínimo por debajo del cual la aptitud para el cultivo es cero (punto de inflexión “a”). De acuerdo a Sparks (1993) la temperatura base para el cálculo del requerimiento de frío de la especie es de 7°C, representando el valor de temperatura por debajo del cual la especie acumula horas de frío necesarias para inducir la brotación y floración. Puede decirse entonces que, entre 0,6°C y 7°C, se da un rango de temperaturas invernales aceptables para el desarrollo del cultivo, por lo cual se asignó la temperatura 7°C para “b”, considerando que todos los X entre 0,6°C y 7°C tomarán valores crecientes de aptitud entre 0 y 255, respectivamente. También se asignó al punto “c” un valor de 7°C, considerándola una temperatura invernal óptima para el desarrollo del cultivo. Por último, se asignó al punto “d” una temperatura de 10°C, por ser la temperatura máxima de la zona nativa del nogal pecán en época invernal (Peterson, 1990).

≈ Temperatura máxima del mes más cálido (Tmax): Para el punto de inflexión “a” se asignó 18,3°C que coincide con la temperatura base para el cálculo de suma de horas de calor (Sparks, 1993). Asimismo, se asignaron valores de 23,9°C y 27°C a los puntos “b” y “c” respectivamente, ya que estas temperaturas se corresponden con los valores medios históricos de temperaturas para los meses de verano en la zona originaria de esta especie, por lo cual, podría considerarse como un rango de temperaturas óptimo para el desarrollo del cultivo (Conti et al., 2018; Ceballos-Silva y López-Blanco, 2010; Peterson, 1990). Por último se asignó al punto “d” un valor de 41°C, temperatura máxima establecida para la producción de nogal pecán (Herrera, 1999).

≈ Precipitaciones (Pp): para esta variable se asignaron los siguientes puntos de inflexión: a= 760 mm; b= 1.000 mm; c= 1.300 mm; d= 2.010 mm. Estos parámetros se definieron de acuerdo a los valores de precipitaciones de la zona originaria de la especie, que van desde 760 mm a 2.010 mm (Peterson, 1990), y de acuerdo al requerimiento para el cultivo definido por Herrera (1999) de 1.000 a 1.300 mm anuales.

Una vez obtenidas las tres capas *fuzzy*, fueron re proyectadas al sistema WGS84/UTM Zone 19S: EPSG32719, y también se les asignó una resolución espacial de 30 metros.

Mapas de restricciones:

Se tuvieron en cuenta como restricciones territoriales los centros poblados de la provincia, la ley de bosques (Ley 5.311, 2010) y las áreas protegidas de la provincia de Catamarca. Para el modelado cartográfico de la capa de restricciones centros poblados, se

utilizó como fuente de datos la capa vectorial (polígono) radios censales de Catamarca correspondiente al Censo Nacional 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC, 2015). Los radios censales determinados por el INDEC, corresponden a áreas que incluyen 300 viviendas, por lo cual, los polígonos correspondientes a los ejidos urbanos, presentan áreas más pequeñas que los polígonos de zonas rurales, debido a la disminución de la densidad poblacional. Esto fue de utilidad en una primera instancia para identificar y diferenciar centros urbanos de zonas rurales.

Utilizando el *software* QGIS 3.16.8 y empleando como mapa base la imagen satelital de *Google Earth*, se superpuso la capa radios censales y se observó el área de estudio para cotejar la correspondencia espacial de los polígonos de los radios con los centros poblados en la imagen satelital. En aquellos casos en que los polígonos estuvieron desplazados, se los corrigió geoméricamente y, en aquellos casos de polígonos faltantes, estos se digitalizaron. Se realizó una clasificación de los polígonos de la capa de acuerdo a la densidad poblacional, diferenciando zonas rurales de zonas urbanizadas. Posteriormente, la capa se rasterizó utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del *software* Idrisi Selva, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel, 21.601 filas y 21.601 columnas, y sistema de proyección WGS84/UTM Zone 19S EPSG:32719. Por último, la capa ráster centros poblados, fue estandarizada por método booleano, para lo cual se re-clasificaron los valores de cada categoría considerando dos opciones: NO APTO (aptitud = 0) para todas las categorías urbano, y APTO (aptitud= 1) para la categoría rural.

Para el modelado cartográfico de la capa de restricciones ley de bosques, se utilizó como fuente de datos la capa vectorial (polígono) Ordenamiento Territorial de Bosque Nativo de la Provincia de Catamarca 2016, obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Ministerio de Agroindustria (Ministerio de Agroindustria, 2016). Las disposiciones de esta ley (Disposición 24, 2012; Ley Nacional 26.331, 2007) establecen los criterios para el Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos y la zonificación resultante en la provincia de Catamarca; en función de esto se determinan tres categorías:

≈ “Categoría I (rojo): sectores de muy alto valor de conservación que deben mantenerse o ser mejorados. Están incluidas en esta categoría las formaciones boscosas y aquellas no boscosas que influyen sobre las áreas que sean esencialmente protectoras en su función, áreas de muy alto valor de conservación de bosques nativos donde pueden realizarse actividades de protección, mantenimiento, recolección, investigación, experimentación, turismo y ganadería que no sea de gran escala, siempre que no alteren los atributos intrínsecos de la formación boscosa y las cabeceras de cuencas hídricas.

≈ Categoría II (amarillo): sectores de mediano valor de conservación, que pueden estar degradados pero que, con la implementación de actividades de restauración, pueden llegar a incrementar su valor de conservación y que pueden ser sometidos a los siguientes usos: aprovechamiento sostenible, aprovechamiento silvo-pastoril bajo monte, turismo, recolección, investigación y experimentación científica.

≈ Categoría III (verde): sectores de bajo valor de conservación que pueden transformarse parcialmente o en su totalidad, con un cambio de uso de suelo que garantice los criterios de la ley. Se consideran, por lo tanto, incluidos dentro de esta categoría: bosques nativos de bajo valor de conservación que pueden transformarse totalmente sin alterar condiciones de sostenibilidad ambiental”.

De acuerdo al artículo 9° de la ley 5.311

no están autorizados los desmontes de bosques nativos en las superficies clasificadas como Categoría I y II, excepto para la ejecución de obras públicas, siempre que cuenten con la Evaluación de Impacto

Ambiental aprobada, y se hayan cumplimentado los requisitos específicos de cada una de las categorías según corresponda. También pueden incorporarse en las áreas de aprovechamientos silvo-pastoril bajo monte (Categoría II), un porcentaje de la superficie para realizar siembras, implantación de especies pastoriles no invasoras o perjudiciales para el funcionamiento del bosque nativo que permitan recuperar o sostener a dicha actividad en épocas desfavorables (Ley 5.311, 2010, art. 9).

A los fines de este trabajo, se consideró que, las tres categorías de ordenamiento territorial de la Ley 5.311 (2010) quedan excluidas de las áreas aptas para plantar nogal pecán, puesto que se trata de una especie exótica originaria de Norteamérica, que puede tener efectos negativos en la conservación de la biodiversidad originaria del bosque nativo. La capa se rasterizó utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del *software* Idrisi Selva, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel, 21.601 filas y 21.601 columnas, y sistema de proyección WGS84/UTM Zone 19S EPSG:32719. Por último, la capa ráster Ley de bosques fue estandarizada por método booleano para lo cual se reclasificaron los valores de cada categoría considerando dos opciones: NO APTO (aptitud = 0) para todas las categorías I, II y III, y APTO (aptitud= 1) a la categoría correspondiente al resto de la superficie de la provincia.

De acuerdo con el artículo 4 de la Ley 22.351 de Parques Nacionales, Reservas Nacionales, Monumentos Naturales

Serán Parques Nacionales las áreas a conservar en su estado natural, que sean representativas de una región fito-zoogeográfica y tengan gran atractivo en bellezas escénicas o interés científico, las que serán mantenidas sin otras alteraciones que las necesarias para asegurar su control, la atención del visitante y aquellas que correspondan a medidas de Defensa Nacional adoptadas para satisfacer necesidades de Seguridad Nacional. En ellos está prohibida toda explotación económica con excepción de la vinculada al turismo, que se ejercerá con sujeción a las reglamentaciones que dicte la AUTORIDAD DE APLICACIÓN. (Ley 22.351, 1980, art. 4, mayúsculas en el original)

De acuerdo a estos criterios, las zonas consideradas áreas protegidas dentro de la provincia de Catamarca resultan NO APTAS para la producción de pecán.

Para el modelado cartográfico de la capa áreas protegidas, se utilizaron como fuentes de datos las capas vectoriales (polígono) sitios RAMSAR y laguna blanca, obtenidos de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Administración de Parques Nacionales de Argentina (Administración de parques nacionales de Argentina, 2018). Utilizando el *software* QGIS, se llevó a cabo la unión de ambas capas vectoriales para obtener la capa temática áreas protegidas. La capa se rasterizó utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del *software* Idrisi Selva, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel 21.601 filas y 21.601 columnas, y sistema de proyección WGS84/UTM Zone 19S EPSG:32719. Por último, la capa ráster áreas protegidas fue estandarizada por método booleano para lo cual se reclasificaron los valores de cada categoría considerando dos opciones: NO APTO (aptitud = 0) para todas las categorías que incluyen unidades espaciales dentro de las áreas protegidas y APTO (aptitud= 1) a la categoría correspondiente al resto de la superficie de la provincia.

Ponderación por ranking recíproco y combinación lineal ponderada

Los tres mapas de factores climáticos obtenidos fueron ponderados de acuerdo al Método por Ranking Recíproco de Malczewski (1999), el cual consiste en un cálculo simple de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[1] \quad w_j = \frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$$

Donde w_j es el valor de ponderación otorgado a cada capa temática y r_j es el número de orden (*ranking*) que se le brinda a cada capa temática de acuerdo a su importancia.

Los valores de ponderación deben cumplir las siguientes propiedades:

$$[2] \quad 0 \leq p_i < 1$$

y

$$[3] \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1$$

Los valores de ponderación asignados surgen de las siguientes consideraciones: de las tres variables climáticas involucradas en este trabajo, las precipitaciones resultan generar una limitación que puede ser mejorada o eliminada a través de la implementación de sistemas de riego complementario (tal cual sucede en el territorio provincial en el cual los desarrollos productivos están condicionados por la disponibilidad de agua para riego). Por tal motivo, al factor precipitaciones, se le asigna una ponderación tres veces inferior a la de los factores Tmax y Tmin (cuadro 2).

Factor	Ranking (r_j)	Ranking recíproco ($1/r_j$)	Ponderación ($\frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$)
Tmax	1	1	0.43
Tmin	1	1	0.43
Pp	3	0.33	0.14
Suma		$\sum 1/r_j = 2.33$	1

Cuadro 2. Método por *ranking* recíproco aplicado a los factores Tmax, Tmin y Pp

Fuente: elaboración personal

Luego de haber obtenido los valores de p_i para cada factor, se aplicó el método de agregación combinación lineal ponderada (WLC), y cada localización del espacio geográfico asumió un valor de aptitud (I) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$[4] \quad I_i = \sum_{j=1}^n x_j p_j \prod r_j$$

Donde I_i es el valor índice para la localización i , \sum es la sumatoria de los resultados brindados por la totalidad de las capas temáticas, p es la ponderación de cada factor, x es el valor específico de cada clase de factor y $\prod r_j$ es la sumatoria de todos los mapas de restricciones.

Con el propósito de analizar las distribuciones espaciales de las distintas clases de aptitud climática y de las restricciones por separado, se procedió a realizar la WLC en dos etapas, para observar resultados parciales. De esta forma, en una primera instancia, se obtuvieron el mapa climático total (por sumatoria de las capas climáticas multiplicadas por su valor de ponderación) y el mapa de restricciones territoriales totales (por multiplicación de las tres capas de restricciones).

Finalmente, aplicando la ecuación 4 completa, se obtuvo el mapa de aptitud final para la producción de pecán en la provincia de Catamarca.

Salidas cartográficas

Utilizando el *software* QGIS 3.16.8, se reclasificó el mapa de aptitud final en 5 intervalos, asignándoles índices según los niveles de aptitud propuestos por FAO (1976) y de acuerdo al cuadro 3. Posteriormente se realizaron las salidas cartográficas.

Clase de aptitud	Índice	Rango de valores de aptitud <i>fuzzy</i>
Muy Apto	4	204-255
Apto	3	153-204
Moderadamente Apto	2	102-153
Marginalmente Apto	1	51-153
No apto	0	0-51

Cuadro 3. Categorías e índices de aptitud asignadas a las capas en la reclasificación
Fuente: elaboración personal (adaptado de Trabichet, 2020)

Resultados

A continuación, se presentan los mapas de las variables climáticas y el mapa de aptitud climática total. Las figuras 2a, 2b, y 2c, corresponden a las variables estandarizadas por método *fuzzy*, mientras que la figura 2d, corresponde al mapa climático total.

En la figura 2a, puede observarse que, hacia el norte y noroeste de la provincia (ecorregiones Altos Andes, Puna y Prepuna), las temperaturas mínimas del mes más frío, resultan no aptas para la producción de pecán; luego, las zonas moderadamente aptas y aptas se distribuyen hacia el sudeste de la provincia en la zona del valle central y la región de Ancasti. Con respecto a las temperaturas máximas del mes más cálido (figura 2b), las zonas muy aptas, aptas y moderadamente aptas, se distribuyen en el centro y sudeste de la provincia, y las no aptas, principalmente en la ecorregión de los Altos Andes. En la figura 2c, correspondiente a la distribución de la aptitud para la variable precipitaciones, se observa que, la superficie total de la provincia, resulta no apta para la producción de pecán.

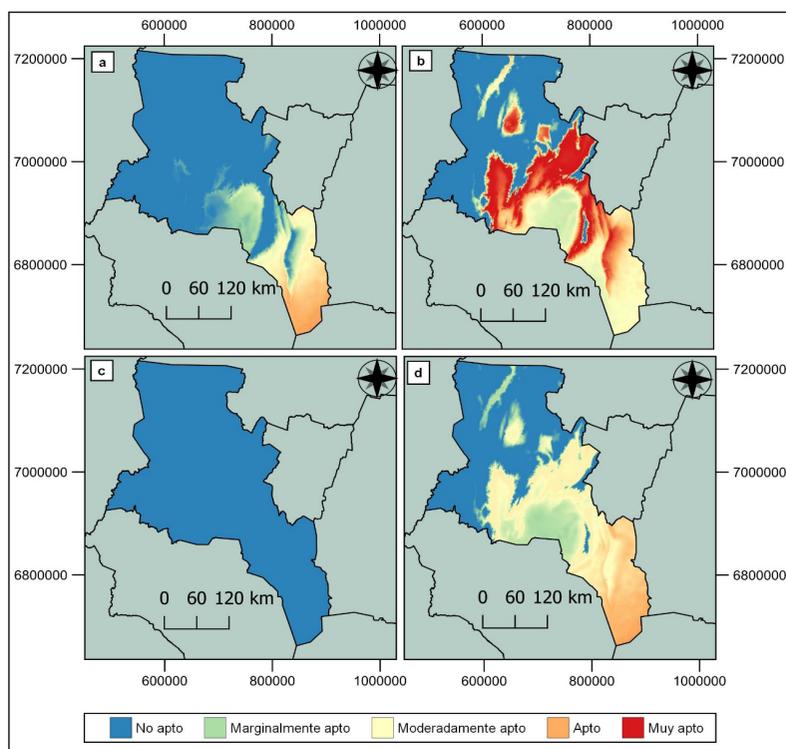


Figura 2. Mapas de variables climáticas (a: Tmin; b: Tmax; c: Pp; d: mapa climático total)
Fuente: elaboración personal

En el mapa climático total (figura 2d) se observan tanto áreas aptas, moderadamente aptas y marginalmente aptas, distribuidas en el centro y sudeste de la provincia; las áreas aptas se concentran principalmente en la zona del Valle Central y la región de Ancasti. La categoría no apto, se distribuye principalmente en el norte y noroeste de la provincia, en las regiones de los Altos Andes y la Puna.

En las figuras 3a, 3b, 3c y 3d, se presentan los mapas de restricciones modelados. Se puede observar en la figura 3d que, aproximadamente, la mitad de la superficie provincial presenta restricciones para la producción de nogal pecán. Esta distribución de las áreas no aptas coincide, en gran parte, con la restricción observada en los mapas ley de bosques (figura 3a) y áreas protegidas (figura 3b).

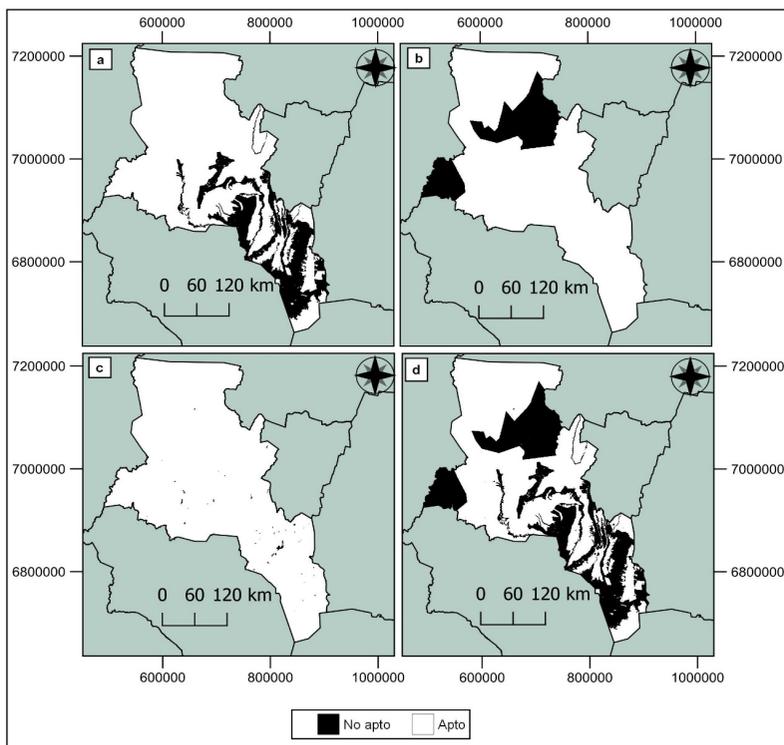


Figura 3. Mapas de restricciones territoriales (a: Ley de bosques; b: áreas protegidas; c: centros poblados; d: mapa de restricciones total)

Fuente: elaboración personal

En la figura 4 se presenta el mapa de aptitud final, reclasificado en cinco categorías. Puede observarse que, gran parte de la extensión de la provincia, se clasifica como no apto y marginalmente apto, y que las categorías apto y moderadamente apto, representan áreas de menores proporciones en comparación. Además, se observa la ausencia de la categoría muy apto. En el cuadro 4, se presenta un resumen con las superficies (km²) obtenidas para cada una de las categorías de aptitud definidas para el mapa de aptitud final.

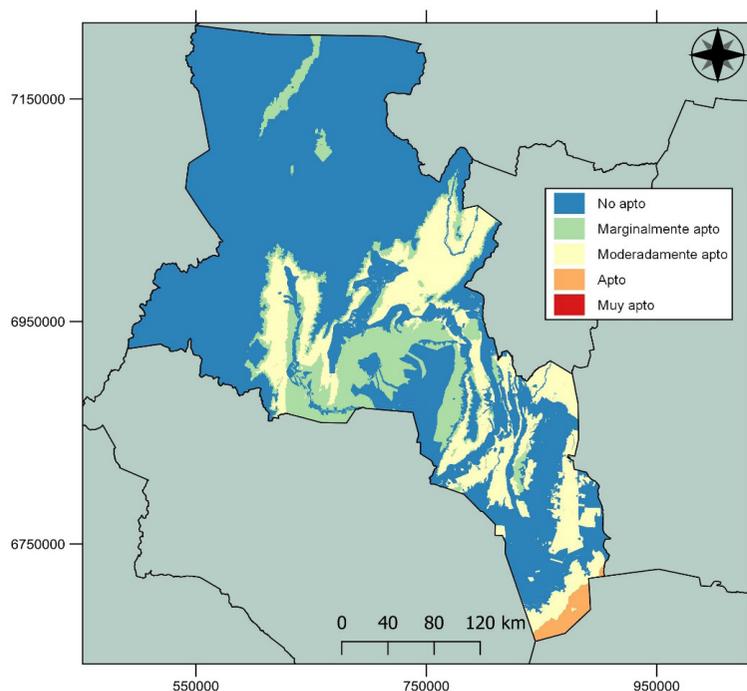


Figura 4. Mapa de aptitud final
Fuente: elaboración personal

Clase	Índice	Superficie
Muy apto	4	0,0
Apto	3	1.028,77
Moderadamente apto	2	18.518,62
Marginalmente apto	1	11.684,60
No apto	0	70.058,98
Total		101.290,00

Cuadro 4. Superficies (km²) de cada categoría para el mapa final de aptitud
Fuente: elaboración personal

Coincidiendo con lo observado en la figura 4, en el cuadro 4, se constata que no se encontraron tierras clasificadas como muy aptas para la producción de nogal pecán y que la mayor proporción del territorio se clasifica como no apto y marginalmente apto.

Discusión de resultados

La provincia de Catamarca cuenta con áreas aptas, moderadamente aptas, marginalmente aptas y no aptas para la producción de nogal pecán. De acuerdo a lo observado en el cuadro 4, las áreas no aptas y marginalmente aptas, representan alrededor de un 80,7% de la superficie provincial y se distribuyen principalmente en la zona de la Puna, Prepuna y Altos Andes (figura 4), coincidiendo con la distribución espacial que presentó esta categoría para los mapas de las variables climáticas y para el mapa climático final; también coincide con la distribución de las restricciones territoriales aplicadas, principalmente la ley de bosques y las áreas protegidas. El resto del territorio (19,3%) se distribuye entre las categorías apto (solo alrededor de un 1%) y moderadamente apto (18,3%), principalmente en el sudeste de la provincia.

Asimismo, de la observación de las figuras 2a, 2b y 2c, puede deducirse que, para las diferentes variables climáticas, la provincia cuenta con distintos grados de aptitud para la producción de pecán, con excepción de la variable precipitaciones, que presentó un 100% de áreas no aptas. Al realizar WLC y aplicar ponderaciones, se permite que esta variable (Pp), cuya limitación puede ser modificada o eliminada a través de la implementación de sistemas de riego, tenga un peso inferior a las demás variables en el mapa climático total y por lo tanto en el mapa de aptitud final.

Consideraciones finales

Los SIG constituyen una herramienta útil para la planificación del territorio. En este trabajo en particular, la metodología aplicada permitió caracterizar la aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán, en función de tres variables climáticas y tres restricciones territoriales.

En función de las variables implicadas en este estudio, la provincia de Catamarca presentó un total 19.547,39 km² de tierras aptas y moderadamente aptas para la producción de nogal pecán. Estas categorías, representan grados de aptitud inferiores al máximo posible (categoría muy apto); esto podría implicar que, si bien es posible producir pecán en dichas áreas, la performance del cultivo podría percibir reducciones en los rendimientos potenciales. Vale mencionar que, en el caso de las precipitaciones, las limitaciones podrían ser eliminadas en forma parcial o total mediante la implementación de sistemas de riego, siempre y cuando existan los recursos hídricos disponibles para ello.

Es importante destacar que, en este trabajo, se delimitaron las zonas aptas para producción a aquellos sitios donde no existen restricciones territoriales para ello; las áreas abarcadas por las capas áreas protegidas, ley de bosques y centros poblados, fueron consideradas no aptas y esto restringió aún más la distribución de las tierras climáticamente aptas para la producción de nogal pecán. De esta manera, las áreas no aptas se localizaron principalmente en la región de Altos Andes, Puna y Prepuna, en donde las condiciones climáticas resultan extremas, y en el centro y sureste de la provincia, donde se observa la preponderancia de las restricciones aplicadas, especialmente ley de bosques y áreas protegidas.

Por último, se considera necesario mencionar que, este trabajo, forma parte de una investigación más amplia, en la cual, se busca caracterizar la aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca en función de varios factores, entre ellos, las variables climáticas y las restricciones territoriales involucradas en este apartado.

Referencias

- Administración de Parques Nacionales de Argentina (2018). *Infraestructura de Datos Espaciales de la Administración de Parques Nacionales de Argentina*. <http://mapas.parquesnacionales.gob.ar/layers/?limit=100&offset=0>
- Akıncı, H.; Özalp, A. Y. & Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.006>
- Akpoti, K.; Kobo-bah, A. T. & Zwart, S. J. (2019). Agricultural land suitability analysis: State of the art and outlooks for integration of climate change analysis. *Agricultural Systems*, 173, 172–208. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.013>
- Buzai, G. y Baxendale, C. (2011). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Perspectiva científica, Temáticas de base ráster* (Tomo 1). Lugar Editorial.

- Cabrera, A. L. (1971). Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 14, 1–42.
- Ceballos-Silva, A. & López-Blanco, J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: A case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 77(2), 117–136. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00103-8)
- Ceballos-Silva, A. P. & López-Blanco, J. (2010). Delineation of Suitable Areas for Alternative Crops: A Multicriteria-GIS Evaluation Approach. *Terra Latinoamericana*, 28, 101–118. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n2/v28n2a2.pdf>
- Conti, H.; Moschini, R. y Cazenave, G. (2018). Zonificación agroclimática del pecan en región pampeana y noreste argentino. *XII Reunión Argentina de Agrometeorología*. San Salvador de Jujuy, Argentina, 8 al 10 de octubre de 2008.
- Disposición 24 de 2012 (2012, 10 de diciembre). *Especies prioritarias de conservación de flora silvestre*. Dirección Provincial de Biodiversidad.
- Eastman, J. R. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS. En A. P. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical information systems. Principles and technical issues* (pp. 493–502). New York, NY, USA: John Wiley and Sons.
- El Baroudy, A. A. (2016). Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *CATENA*, 140, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.010>
- FAO (1976). A framework for land evaluation. *FAO soils bulletin*, (32).
- FAO (2007). Land evaluation: Towards a revised framework. *Land and water discussion paper*, (6).
- Feng, Q.; Chaubey, I.; Engel, B.; Cibin, R.; Sudheer, K. P. & Volenec, J. (2017). Marginal land suitability for switchgrass, Miscanthus and hybrid poplar in the Upper Mississippi River Basin (UMRB). *Environmental Modelling and Software*, 93, 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.027>
- Gómez, L. A. y Cruzate, G. A. (2007). Aptitud de los suelos argentinos para el pecan (*Carya illinoensis*). En R. Lavado y E. Frusso (Eds.), *Producción de Pecán en Argentina* (pp. 1–9). Buenos Aires: INTA-FAUBA.
- Herrera, E. (1999). *Selecting soil and Site for a Pecan Orchard*. Cooperative Extension Service. College of Agriculture and Home Economics. New Mexico State University.
- IGN (2018). *Provincias*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- INDEC (2015). *Unidades Geoestadísticas - Cartografía y códigos geográficos del Sistema Estadístico Nacional*. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Institucional-Indec-Codgeo>
- Ley Provincial 5311 de 2010 (2010, 13 de septiembre). *Ordenamiento ambiental y territorial del bosque nativo*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/arg177454.pdf>
- Ley Nacional 26.331 de 2007 (2007, 28 de noviembre). *Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos*. <http://www.derecho.uba.ar/academica/derecho-abierto/archivos/Ley-26331.pdf>
- Ley Nacional 22.351 de 1980 (1980, 5 de diciembre). *Parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales*. http://www.saij.gob.ar/legislacion/ley-nacional-22351-parques_nacionales_reservas_nacionales.htm?2
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, NY, USA: John Wiley and Sons.

- Malczewski, J. (2006). Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.01.003>
- Ministerio de Agroindustria (2016). *IDE Agroindustria. Ordenamiento territorial de bosques nativos-Catamarca*. <http://ide.agroindustria.gob.ar/visor/>
- Montgomery, B.; Dragičević, S.; Dujmović, J. & Schmidt, M. (2016). A GIS-based Logic Scoring of Preference method for evaluation of land capability and suitability for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 340–353. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.013>
- Núñez Aguilar, F. A. y Álvarez de Toledo, J. M. (2004). *El Riego en la provincia de Catamarca. Desarrollo social y ambiental sostenible de la región de América Latina y el Caribe*. Banco Mundial.
- Peterson, J. K. (1990). *Carya illinoensis* (Wangenh.) Koch. Pecan. En R. M. Burns y B. H. Honkala (Eds.), *Silvics of North America. Volume 2. Hardwoods* (pp. 205-210). U.S. Department of Agriculture. Forest Service.
- PROSAP-UCAR (2015). *Plan de mejora competitiva Cluster de la nuez pecán*.
- Reshmidevi, T. V.; Eldho, T. I. & Jana, R. (2009). A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems*, 101(1–2), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2009.04.001>
- Romano, G.; Dal Sasso, P.; Trisorio Liuzzi, G. & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.013>
- SAGyP-INTA (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina* (1a ed.). Buenos Aires: SAGyP-INTA.
- Sparks, D. (1993). Chilling and heating model for pecan budbreak. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(1), 29–35. <http://journal.ashspublications.org/content/118/1/29.abstract>
- Sparks, D. (1997). A model for predicting pecan production under arid conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122(5), 648–652.
- Trabichet, F. C. (2020). Caracterización de la aptitud de los suelos de la provincia de Catamarca mediante sistemas de información geográfica. *Revista Huellas*, 24(2), 47–63.
- Varela S.; Terribile, L. C.; de Oliveira, G.; Diniz-Filho, J. A. F.; González-Hernández, J. & Lima-Ribeiro, M. S. (2015). ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía. *Ecosistemas*, 24(3), 88–92. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-3.11>
- Walke, N.; Obi Reddy, G. P.; Maji, A. K. & Thayalan, S. (2012). GIS-based multicriteria overlay analysis in soil-suitability evaluation for cotton (*Gossypium* spp.): A case study in the black soil region of Central India. *Computers & Geosciences*, 41, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.020>
- Yu, J.; Chen, Y. & Wu, J. (2011). Computers, Environment and Urban Systems Modeling and implementation of classification rule discovery by ant colony optimisation for spatial land-use suitability assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(4), 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2010.12.003>
- Zhang, R.; Peng, F. & Li, Y. (2015). Pecan production in China. *Scientia Horticulturae*, 197, 719–727. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.035>

Florencia Cecilia Trabichet es Ingeniera Agrónoma (UNLu). Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio del medio ambiente (UNLu). Becaria doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Alumna regular de la carrera Doctorado en Ciencias Agrarias de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral. Proyecto doctoral "Determinación de la aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca utilizando sistemas de información geográfica". Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Lujan. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INIGEO UNLu-CONICET). Ruta 5 y Avenida Constitución - (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina, flortrabichet@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5886-6208>