

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS CONTINUOS DE APTITUD PARA USOS AGROFORESTALES

INÉS SANTÉ RIVEIRA¹ y RAFAEL CRECENTE MASEDA²

Laboratorio del Territorio. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario s/n. 27002, Lugo. España.

¹isante@lugo.usc.es, ²rcrecente@lugo.usc.es

RESUMEN

La obtención de mapas continuos de aptitud es fundamental para la posterior planificación espacial de los usos del suelo. En este trabajo se ha realizado una revisión de las metodologías existentes, de las cuales se han seleccionado las mejor adaptadas a las condiciones de la zona de estudio y a la información disponible. Estos métodos se han sometido a un análisis comparativo para evaluar sus potencialidades y deficiencias. Las técnicas de evaluación multicriterio contribuyen a reducir la subjetividad, siempre presente en la evaluación de tierras, frente a otros métodos más cualitativos como el esquema FAO. Dentro de la evaluación multicriterio, el análisis de punto ideal permite una fácil implementación en SIG y la realización de análisis de sensibilidad que contribuyen a una mejor comprensión de los resultados del proceso de evaluación.

Palabras clave: Evaluación de tierras, mapas continuos de aptitud, evaluación multicriterio, esquema FAO.

ABSTRACT

Continuous land suitability maps are necessary for later spatial land use planning. In this paper, a bibliographic review about current methodologies was undertaken, and those more suitable for the study area and the available information were selected. These methods were analyzed to evaluate their potentialities and deficiencies. Multi-criteria evaluation techniques contribute to reduce the subjectivity, always present in land evaluation, regarding other qualitative methods as FAO framework. In the case of multi-criteria evaluation, the so-called ideal point analysis is easily done in GIS and it allows sensitive analysis, so providing further understanding of evaluation process results.

Keywords: Land evaluation, continuous land suitability maps, multi-criteria evaluation, FAO framework.

1. Introducción

La evaluación de tierras consiste en la determinación del grado de satisfacción de los requerimientos de cada tipo de uso o actividad proporcionado por el suelo. La determinación de la aptitud, definida por un uso y una unidad territorial, constituye la base para la posterior planificación y gestión del conjunto de usos en la totalidad del territorio.

Desde 1950 la evaluación de tierras ha evolucionado hacia valoraciones más cuantificadas y precisas, con una mayor repercusión de los factores no edafológicos (Van Diepen, 1991). Sin embargo, actualmente son ampliamente aplicados modelos como la Clasificación de la Capacidad de la Tierra del USDA (Klingebiel y Montgomery, 1961), que ha sido adaptado a las condiciones específicas de numerosos países (p. ej., Condon, 1968; McCormack, 1971; Ministerio de Agricultura, 1974), o la Clasificación de la Tierra para Regadío del USBR, diseñados hace más de cuarenta años. Desde los años 30 (Storie, 1933), se comenzaron a aplicar modelos matemáticos para determinar la capacidad productiva de los suelos, son los llamados índices paramétricos. Entre estos índices destaca el índice de Storie (Storie, 1970). Otros índices son, por ejemplo, el método Riquier-Bramao (Boixadera y Porta, 1991) o el índice de productividad (Pierce et al., 1983). Estos modelos evalúan la capacidad de la tierra, es decir, la productividad para la mayoría de cultivos, contrariamente a la tendencia actual de evaluación de la aptitud, esto es, la productividad para ciertos cultivos específicos.

Debido a las diferencias existentes entre los distintos sistemas de evaluación de tierras en cuanto a terminología, propósito y procedimientos analíticos, en 1976 la FAO publicó *A Framework for Land Evaluation*, que permitió una estandarización de la metodología y la terminología. Este esquema, que se ha convertido en la principal referencia para la evaluación de tierras (Van Diepen, 1991), no constituye un sistema de evaluación en sí mismo sino que establece unas directrices generales sobre las cuales se puede construir uno. El proceso central de este esquema es la comparación de las cualidades de la tierra de cada unidad espacial con los requerimientos de cada tipo de utilización de la tierra. Los diferentes procedimientos de comparación son descritos en posteriores publicaciones (FAO, 1983, 1985a, 1985b, 1993).

El procedimiento de comparación que se ha usado tradicionalmente es la clasificación booleana, en la cual la clase de aptitud de una unidad de tierra es definida por la cualidad de la tierra más desfavorable. Este enfoque implica una división brusca de la superficie en diferentes clases de aptitud, que a su vez implica una gran pérdida de información (Burrough et al., 1992). Hall et al. (1992) proponen un método basado en la lógica borrosa para la clasificación de la aptitud de la tierra, según el cual un área está caracterizada por su grado de pertenencia a las distintas clases de aptitud. Este tipo de análisis reduce la pérdida de información y proporciona resultados que contribuyen a una mayor discriminación entre áreas para la posterior planificación de los usos del suelo. Otras aplicaciones de la lógica borrosa a la combinación de cualidades de la tierra en clases de aptitud del esquema FAO han sido llevadas a cabo por Tang et al. (1991) y Van Ranst et al. (1996). Siguiendo esta misma línea, Triantafilis et al. (2001) incorporaron al esquema FAO un modelo de valoración de la aptitud basado en una función de pertenencia con el fin de obtener mapas de aptitud continuos.

Los primeros métodos de evaluación de tierras, previos al esquema FAO, estaban centrados en la componente edafológica de la evaluación de tierras. Posteriormente se añadió un enfoque económico, motivado por el hecho de que a menudo la elección de un uso u otro se basa en su rendimiento económico. En la actualidad, los modelos de evaluación de tierras deben considerar nuevos usos (p. ej. ambientales, recreativos) y factores (p. ej. presión urbanística) que exigen la valoración de los recursos naturales, económicos y sociales. Esta necesidad fue contemplada en el desarrollo del esquema FAO y otros sistemas de evaluación de tierras más recientes, como el *Land Evaluation and Site Assessment* (LESA), destinado a la conservación de las mejores tierras agrícolas (California Department of Conservation, 1997). Otro sistema posterior al esquema FAO es el *Fertility Capability Classification* (FCC) (Sánchez et al., 1982, 2003), que agrupa los suelos en función del tipo de problemas que presentan para la gestión agronómica. En las décadas de los 80 y 90, la FAO desarrolló una metodología para la evaluación de tierras en áreas muy extensas, llamada Zonificación Agro ecológica (AEZ), que sigue el esquema FAO e incluye un software para su implementación.

Actualmente, el creciente desarrollo de modelos dinámicos de simulación de cultivos (p. ej., De Wit y Van Keulen, 1987; Dumanski y Onofrei, 1989; Van Diepen et al., 1991; Jones et al., 2003; Stöckle et al., 2003) responde a la necesidad de predicciones más cuantificadas y precisas del rendimiento de los cultivos, pero a expensas de un mayor requerimiento de información. Otras investigaciones más recientes se basan en el uso de la metodología de conjuntos borrosos en SIG para la valoración de la aptitud de la tierra. Burrough (1989) determinó la aptitud para el cultivo de trigo clasificando las diferentes propiedades del suelo en valores continuos mediante funciones de pertenencia borrosa, y combinando estos en un único valor mediante un método de combinación convexa. Esta misma metodología fue aplicada por Davidson et al. (1994) en la evaluación de la aptitud de la tierra para diferentes cultivos. Baja et al. (2002) desarrollaron índices de aptitud de la tierra basados también en esta teoría. Estos índices pueden ser combinados para crear un índice de aptitud medioambiental para usos del suelo rural (Baja et al., 2001).

Otras técnicas empleadas para este propósito son los sistemas expertos y las redes neuronales. Entre los sistemas expertos puede citarse el sistema de información espacial diseñado por Diamond y Wright (1988), el sistema experto de información geográfica, EXGIS, desarrollado por Yialouris et al. (1997), que combina el esquema FAO y la experiencia local para formular las reglas de decisión que constituyen el sistema experto y el sistema MicroLEIS (De la Rosa et al., 1992), también basado en el esquema FAO. Wang (1994) sugiere la integración de las redes neuronales artificiales con SIG para la evaluación de la aptitud de la tierra y la asignación de usos del suelo.

Asimismo, los métodos de evaluación multicriterio son frecuentemente integrados en un SIG para el análisis del emplazamiento óptimo para una actividad, permitiendo la obtención de mapas continuos de aptitud. El análisis multicriterio proporciona el marco adecuado para la integración de los distintos factores (medio ambiente, economía y sociedad) que intervienen en la aptitud del suelo para cada uso. Existen diversas técnicas de evaluación multicriterio aplicables a la evaluación de la aptitud de la tierra para un uso del suelo, entre las cuales la suma lineal ponderada es la más sencilla y la más frecuentemente aplicada (Eastman et al., 1998; Engelen et al., 1999; Jun, 2000; Mendoza, 1997; Ridgley y Heil, 1998; Weerakoon, 2002). Otra técnica de evaluación

multicriterio empleada con este propósito es el análisis de punto ideal, en el cual se calculan las distancias de cada alternativa con respecto a un punto ideal, para cada criterio. La mejor alternativa (unidad espacial) será aquella que tenga una menor distancia al punto ideal. Se han desarrollado diversas técnicas que emplean distintas medidas de distancia al punto ideal (Barredo, 1996; Carver, 1991; Malczewski, 1996; Pereira y Duckstein, 1993). Otro método de evaluación multicriterio que ha sido incorporado en distintas aplicaciones SIG para la realización de análisis de aptitud es el Proceso de las Jerarquías Analíticas (AHP, *Analytic Hierarchy Process*) (p. ej., Banai, 1993; Eastman, 1995; Jun, 2000; Mendoza, 1997; Weerakon, 2002). Este método representa un problema específico mediante una estructura jerárquica y después establece las prioridades de las alternativas basándose en el juicio del usuario.

El propósito de esta investigación es definir una metodología que permita la obtención de mapas de aptitud para usos agroforestales, la cual pueda ser integrada en un modelo de ordenación de todos los usos existentes en el suelo rural de una comarca de Galicia. Para ello, en primer lugar, se analizó la información disponible y los usos agroforestales en una comarca lo suficientemente representativa de la diversidad y complejidad del medio rural gallego: Terra Chá. En segundo lugar, se seleccionaron los sistemas de evaluación de tierras que más se adaptaban a las condiciones existentes en el ámbito de la planificación de usos del suelo en esta comarca. Finalmente, se evaluaron y analizaron los resultados obtenidos con los métodos seleccionados. Estos mapas de aptitud fueron empleados en los "*Estudios de ordenación productiva agraria en 17 comarcas de la comunidad autónoma de Galicia*" (Laborate-EIDO, 2003).

2. Características del área de estudio

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la comarca de Terra Chá, la más extensa de Galicia (1.832 km²), situada en la parte central de la provincia de Lugo. Esta región está conformada en su mayor parte por una amplia llanura de altitudes comprendidas entre 400 y 500 m, donde se asientan los principales núcleos de población y una mayor actividad agraria, mientras que la zona meridional, donde el relieve es más accidentado y al altitud es mayor, se caracteriza por una menor población y actividad económica. Esta comarca posee una población de 49.560 habitantes, de los cuales 7.706 se dedican a la agricultura, actividad que ocupa el 53% de la superficie comarcal.

2.2. Definición de los tipos de utilización de la tierra

En el esquema FAO se describe 'tipo de utilización de la tierra' como un uso del suelo definido con la precisión que el propósito requiera. En este estudio los tipos de utilización de la tierra considerados son los usos agroforestales que cumplen las siguientes condiciones: i) presentar un grado de adaptación variable en las distintas zonas de la comarca a evaluar, de tal modo que la evaluación de la aptitud de la tierra refleje distintos grados de adecuación al uso, ii) ser un uso importante en la comarca, y iii) disponer de información sobre sus requerimientos (Boixadera y Porta, 1991).

Para la identificación de los usos agroforestales se han tomado como base los aprovechamientos de la tierra existentes en la comarca según las Estadísticas Agrarias 2001 del Sistema de Información Territorial de Galicia (SDC-Xunta de Galicia, 2003). Los usos con una mayor superficie se han considerado individualmente mientras que aquellos menos representativos o con requerimientos similares (p. ej. 'hortalizas') se han agrupado en categorías.

Finalmente, los usos agroforestales que se han considerado son los siguientes: maíz, trigo, patata, forrajes verdes plurianuales, hortalizas, frutales, prados, pastizales, eucalipto, resinosas y frondosas caducifolias. Cada uno de estos tipos de utilización de la tierra se ha caracterizado a través de una serie de atributos: producto, orientación comercial, nivel tecnológico (mecanización, genética, fertilizantes...), infraestructuras requeridas, prácticas de cultivo, producción media, intensidad de capital, intensidad de mano de obra, conocimientos técnicos y actitudes de los usuarios de la tierra, impacto ambiental e *inputs* (véase [tabla 1](#)). Se ha procurado que esta descripción sea lo suficientemente precisa para la evaluación de la aptitud pero no demasiado detallada para que permita la inclusión de todas las actividades de producción desarrolladas en la comarca.

2.3. Descripción de las cualidades de la tierra

Cada tipo de utilización de la tierra exigirá diferentes condiciones agronómicas, ambientales, socioeconómicas y de manejo para una explotación sostenible y económicamente viable. La aptitud de la tierra para los usos agroforestales depende cada vez menos de los factores edafológicos. La mejora genética y la capacidad de mejorar las condiciones naturales de los suelos han provocado que actualmente los factores más restrictivos para la implantación de un cultivo o aprovechamiento sean de carácter social, económico o político. Entre los requerimientos inicialmente identificados para una caracterización óptima de los usos, se han seleccionado aquellos cuya evaluación es posible con la información actualmente disponible (véase [tabla 2](#)). De este modo los requerimientos finalmente seleccionados se corresponden con la información utilizada para caracterización de la tierra.

Cada una de las cualidades de la tierra enumeradas en la tabla 2 corresponde a un factor de evaluación que se ha incorporado como una capa independiente en un SIG raster. La mayor parte de esta información estaba disponible en formato vectorial por lo que fue suficiente un simple proceso de rasterización para obtener las capas raster correspondientes a los factores de evaluación. En algunos casos (p. ej., capacidad productiva del suelo) fue necesario digitalizar la información a partir de mapas en formato papel. Los mapas de densidad de red viaria, distancia a mercados y distancia a red viaria fueron obtenidos mediante distintos comandos de análisis espacial del SIG raster.

3. Métodos

A la hora de comparar los distintos sistemas de evaluación de tierras es fundamental considerar el fin para el que van a ser empleados y los resultados que se esperan obtener de los mismos. Dentro del contexto de la planificación de usos del suelo, la elección del método de evaluación de tierras dependerá, en gran medida, de los usos considerados en la planificación. Cuando el objetivo es el diseño de un modelo de ordenación de todos los usos del suelo presentes en el medio rural, es preciso aplicar previamente un sistema de evaluación de tierras en el cual los usos a evaluar sean muy específicos y se definan con gran precisión. Esta condición excluye a los 'sistemas de capacidad', cuya finalidad es la clasificación de las tierras para un uso general, ampliamente definido, que, en el caso de los métodos descritos anteriormente, correspondería a un uso agrario tradicional.

Además, en el marco de la ordenación del territorio la evaluación de tierras no debería limitarse a la valoración de las características biofísicas, sino que debería comprender el análisis de la aptitud física, la viabilidad económica, las consecuencias sociales y el impacto ambiental producido. Para ello el esquema de la FAO proporciona un sistema flexible en el que integrar las distintas valoraciones, pero que, al mismo tiempo, exige un complejo desarrollo para cada aplicación concreta. Otro inconveniente de la metodología FAO es la obtención de un resultado poco cuantificado (la tierra es clasificada en cinco categorías) que no puede ser utilizado, por ejemplo, como información de entrada para la selección del uso óptimo mediante técnicas de evaluación multicriterio, como el análisis de punto ideal o el módulo MOLA de IDRISI. Esta limitación es superada en las evaluaciones basadas en la metodología de conjuntos borrosos, las cuales proporcionan mapas de aptitud continuos (constituidos por valores numéricos comprendidos, por ejemplo, entre 0 y 1), pero en éstas sólo se consideran variables biofísicas como factores de evaluación. Por otra parte, la aplicación de esta teoría exige información precisa sobre las propiedades físico-químicas del suelo y sobre el nivel de requerimiento de las mismas para los distintos cultivos o usos.

Los factores condicionantes de la aplicación de estas metodologías en Terra Chá son; la carencia de información edafológica detallada para toda la comarca, la necesidad de considerar los factores socioeconómicos como elementos determinantes de la aptitud y la inexistencia de modelos o sistemas adaptados a la zona. Una vez excluidos los sistemas de capacidad, sólo el esquema FAO, los sistemas expertos y la evaluación multicriterio permiten la inclusión en la valoración de factores socioeconómicos (véase [tabla 3](#)). Los sistemas expertos mencionados en la introducción no proporcionan mapas de aptitud continuos y además exigirían un complejo desarrollo para su adaptación a las condiciones específicas de la comarca evaluada. Por ello el esquema FAO se presenta como uno de los métodos de evaluación más adecuado, pero para que este esquema proporcione mapas continuos de aptitud del suelo (necesarios para la posterior aplicación de algunos métodos de asignación espacial de usos) es preciso emplearlo conjuntamente a otras técnicas, como una función continua de aptitud (Triantafilis et al., 2001).

Otras técnicas que permiten la obtención de mapas continuos y la consideración de factores socioeconómicos son los métodos de evaluación multicriterio integrados en un SIG. En este estudio se ha seleccionado el análisis de punto ideal por ser una de las técnicas de evaluación multicriterio

de mayor potencia operativa (Barredo, 1996) y, además, fácilmente implementable en un SIG. Asimismo, se ha aplicado el AHP para la asignación de los pesos empleados en este análisis.

Estos dos métodos, el esquema FAO con puntuación de limitación y el análisis de punto ideal, han sido evaluados para identificar las dificultades y oportunidades de su aplicación a la evaluación de la aptitud de la tierra para los usos agroforestales de una comarca de Galicia.

4. Esquema FAO y puntuación de limitación

El esquema FAO (1976) comprende las siguientes etapas: i) definición de los tipos de utilización de la tierra, ii) determinación de los requerimientos de los tipos de utilización de la tierra, iii) descripción de las cualidades de la tierra, iv) definición de las unidades cartográficas de evaluación y v) comparación de las cualidades de la tierra de cada unidad cartográfica con los requerimientos de cada tipo de uso del suelo. Las primeras tres etapas ya se han comentado en el apartado 2. La implementación de este esquema en un SIG raster permite la utilización de las celdas raster como unidades cartográficas básicas, por lo que en este apartado se describe el proceso de comparación de las cualidades de la tierra y los requerimientos de los usos.

Se ha aplicado como método de comparación el sistema de puntuación de la limitación empleado por Triantafylis et al. (2001). En este sistema se establece el grado de limitación de cada cualidad de la tierra para un uso determinado. Se han definido cinco grados de limitación que expresan la influencia de un determinado valor de una cualidad de la tierra en el rendimiento y sostenibilidad de un uso del suelo (véase [tabla 4](#)).

La puntuación del grado de limitación de las cualidades de la tierra para los distintos usos se ha realizado mediante revisión bibliográfica y consultas a expertos. La información bibliográfica disponible sobre los requerimientos de cada tipo de utilización, expresados como cualidades de la tierra, es escasa, principalmente en lo que se refiere a las cualidades socioeconómicas. En el caso de las cualidades biofísicas los datos existentes se restringen normalmente a situaciones óptimas o límite de crecimiento (Boixadera y Porta, 1991), quedando sin definir la adecuación de un amplio rango de valores de las cualidades de la tierra. Debido a esto, en la mayoría de las ocasiones, correspondería al evaluador asignar el grado de limitación. Con el fin de reducir la subjetividad, se realizó una encuesta a 36 ingenieros técnicos forestales y agrícolas. En la [tabla 5](#) se muestra un ejemplo del tratamiento realizado a los resultados de las 36 encuestas para el cálculo de la puntuación de limitación de las cualidades de la tierra. Se seleccionó el grado de limitación más frecuentemente asignado a cada valor de una cualidad, en el total de encuestas, para la evaluación de las características de la tierra para un uso específico (véase [tabla 6](#) y [tabla 7](#)).

La puntuación de limitación acumulada es obtenida como suma de las puntuaciones de limitación individuales de cada uno de los factores y expresa la limitación conjunta de todas las cualidades de la tierra de una unidad cartográfica para un uso específico del suelo. Esta puntuación acumulada puede ser representada mediante una función de pertenencia, en este caso una función lineal y una función sigmoideal (véase [figura 1](#)), para obtener un mapa continuo de aptitud. Existen varias funciones adecuadas para definir grados de pertenencia pero la función sigmoideal es probablemente la más usada dentro de la teoría de conjuntos borrosos, utiliza una función coseno y

requiere cuatro puntos que definen la forma de la curva (a, b, c, d). Para obtener un mapa de aptitud a partir de la puntuación de limitación acumulada se ha utilizado una función sigmoideal monótona decreciente (ya que cuanto mayor es la limitación menor es la aptitud), en la cual los puntos a, b y c son idénticos:

$$\mu = \cos^2 \alpha$$
$$\alpha = [(x - c)/(d - c)] \times \pi / 2$$

siendo μ la aptitud para el uso considerado, c el valor mínimo de la puntuación de limitación acumulada y d el valor máximo de la puntuación de limitación acumulada. El resultado (μ) es un valor de pertenencia, para cada unidad cartográfica de evaluación, comprendido entre 0, que expresa pertenencia a la clase de tierra 'no apta', y 1, que expresa pertenencia a la clase de tierra 'apta'. Los valores intermedios indican la graduación continua de aptitud entre estas dos clases.

La función lineal es similar pero supone una variación menos gradual de la aptitud para los valores extremos de limitación:

$$\mu = (d - x)/(d - c)$$

Al aplicar estas dos funciones a la puntuación de limitación acumulada resultante de las tablas 6 y 7 se obtienen los mapas de aptitud para el maíz y el eucalipto representados en la [figura 2](#) y la [figura 3](#).

5. Análisis de punto ideal

El análisis de punto ideal se incluye dentro de las técnicas de evaluación multicriterio compensatorias, las cuales se basan en la suposición de que un valor bajo de un factor puede ser compensado por un valor alto de otro factor para la misma alternativa. Para poder realizar estas compensaciones, las puntuaciones de los factores, medidas en diferentes escalas, deben ser normalizadas, y los pesos de los mismos, que reflejan la importancia relativa de cada factor en la evaluación, deben establecerse de forma cuantitativa. Los modelos basados en el concepto de punto ideal se fundamentan en el cálculo de la distancia de cada alternativa al punto ideal, que será aquel con el mejor valor para cada uno de los factores. Las mejores alternativas serán aquellas más próximas al punto ideal. Para la obtención de los mapas de aptitud para cada tipo de utilización del suelo mediante el análisis de punto ideal se ha seguido el procedimiento descrito en Barredo (1996): i) normalización de los factores de evaluación, ii) asignación de pesos a los factores, iii) cálculo de la distancia de cada alternativa al punto ideal y iv) normalización de los valores de aptitud.

5.1. Factores de evaluación

Los factores de evaluación utilizados en este análisis coinciden con las cualidades de la tierra empleadas en el procedimiento anterior (véase [tabla 8](#) y [tabla 9](#)), con el fin de poder comparar los resultados obtenidos en ambos métodos.

5.2. Normalización de los factores

Para hacer comparables los mapas de factores se ha realizado la normalización de los mismos, de modo que un valor de 0 representa la mínima aptitud y un valor de 1 la máxima, mediante la siguiente ecuación:

$$e_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i}$$

siendo e_i el valor normalizado de la alternativa i y x_i el valor de la alternativa i . Los factores basados en datos temáticos se han puntuado entre 0 y 1 mediante un procedimiento de comparación por pares.

5.3. Asignación de los pesos de los factores

Para la asignación de los pesos de los factores se ha aplicado el proceso de la jerarquía analítica (AHP) mediante el módulo WEIGHT del software SIG IDRISI. Este método implica la comparación de pares de factores en una matriz. Para la elaboración de estas matrices se realizó, igual que en el método anterior, una encuesta a 36 técnicos, que sirvió de orientación para la introducción de las puntuaciones. El AHP proporciona un método matemático para traducir estas matrices de comparación de pares de factores en un peso numérico para cada factor.

5.4. Integración de factores

Las alternativas (celdas raster) más cercanas al punto ideal serán las más aptas para el uso evaluado, mientras que las más distantes serán las más desfavorables. La distancia de cada alternativa al punto ideal se obtiene a través de la ecuación:

$$L_p = \left[\sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^p \right]^{1/p}$$

siendo L_p la distancia entre la alternativa i (celda i) y el punto ideal de aptitud, w_j el peso del factor j , e_{ij} el valor normalizado de la alternativa i en el factor j , 1 el valor del punto ideal para factores

normalizados y p la métrica utilizada. A medida que p aumenta adquieren mayor importancia relativa las desviaciones de factores individuales.

En este estudio se han aplicado tres valores estratégicos de p ; $p=1$, que supone una compensación total entre factores por lo que es equivalente a la suma lineal ponderada, $p=2$, que representa una compensación parcial de los factores de evaluación y $p=10$, ya que según Pereira y Duckstein (1993) para criterios estandarizados en el rango $[0, 1]$ la mayor desviación domina totalmente la evaluación cuando p es mayor que un valor aproximadamente igual a 10. Las ecuaciones correspondientes a los análisis para $p=1$, $p=2$ y $p=10$ serán respectivamente:

$$L_1 = \sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|$$

$$L_2 = \left[\sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^2 \right]^{1/2} \quad (\text{distancia euclidiana})$$

$$L_{10} = \left[\sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^{10} \right]^{1/10}$$

5.5. Normalización del resultado

Para convertir los valores de distancia al punto ideal en el mapa de aptitud final, donde 1 represente la máxima aptitud y 0 la mínima, se emplea la siguiente ecuación de normalización que usa los valores mínimo y máximo del mapa de distancias:

$$a_i = \frac{\max L - L}{\max L - \min L}$$

siendo a_i la aptitud de la alternativa i y L la distancia al punto ideal calculada por una de las tres fórmulas anteriores. Estos valores normalizados son los que se representan en los mapas de aptitud (véase [figura 4](#) y [figura 5](#)).

6. Resultados

Los mapas de aptitud obtenidos por los dos métodos fueron clasificados en 10 categorías, usando intervalos iguales, con el fin de comparar la superficie (número de celdas) asignada a cada clase (Chen, 2001). En la [figura 6](#) y [figura 7](#) se presentan los resultados obtenidos para los once tipos de utilización de la tierra evaluados.

El análisis de estos gráficos y la comparación visual de los mapas de aptitud revela que los dos métodos producen clases de aptitud evidentemente dispares. El esquema FAO asigna una menor superficie a las clases de aptitud muy baja que el análisis de punto ideal y, por el contrario, las

clases de aptitud muy alta abarcan una mayor superficie en los mapas obtenidos mediante el esquema FAO. En el análisis de los once tipos de utilización de la tierra sólo en una ocasión no se cumple la afirmación anterior; en las clases de aptitud muy alta para los frutales. A esto hay que añadir que la distribución espacial de estas clases de aptitud tampoco es consistente, ya que el porcentaje de coincidencia espacial entre los mapas de aptitud obtenidos mediante el análisis de punto ideal con $p=2$ y mediante el esquema FAO (porcentaje de píxeles con clase de aptitud coincidente en ambos métodos) es muy reducido, oscilando entre el 10 % y el 25 % en todos los casos.

Dentro del esquema FAO el empleo de una función de normalización sigmoideal hace que se asigne una mayor superficie a las clases de aptitud extremas; aptitud muy alta (clases de la 8-9 a la 10) o aptitud muy baja (clases de la 1 a la 3-4). La función lineal asigna una mayor superficie a las clases de aptitud intermedias. Esto es debido a la forma de estas funciones, ya que como se puede ver en la [figura 1](#), en la función sigmoideal los valores extremos implican una variación más gradual que en la función lineal.

En el análisis de punto ideal la métrica $p=1$ asigna un mayor porcentaje de superficie a las clases de aptitud muy alta (clases 8-10), que son las que interesan para la posterior asignación espacial de usos del suelo, debido a que la compensación entre criterios es total, es decir, si una celda tiene una puntuación baja en un conjunto de criterios pero posee una buena puntuación en otra serie de criterios todavía puede obtener una puntuación razonablemente alta (Pereira y Duckstein, 1993). Para $p=10$ son difíciles de obtener puntuaciones muy altas ya que la compensación entre criterios es débil por lo que la aptitud se basará en los criterios que presentan una mayor desviación con respecto al ideal. En este caso, debido a que el número de factores de evaluación es elevado (15), la probabilidad de que una zona presente valores altos para todos los factores es aún menor, como consecuencia se asigna menos superficie a las clases de aptitud alta y mayor superficie a las clases de aptitud baja, siendo el punto de inflexión la clase 6 o la 5. La única excepción se produce en las clases de aptitud baja de los usos forestales, debido probablemente a que el número de factores de evaluación es menor y el resultado dependerá en mayor medida de los factores a los que se haya asignado un mayor peso. Con $p=2$ se produce una situación intermedia con compensación parcial entre los criterios. En los gráficos se observa que las métricas $p=1$ y $p=2$ producen resultados similares (con excepción de los usos forestales). Lo más frecuente es que las clases de aptitud muy alta tengan una mayor superficie para $p=1$ ya que la compensación entre criterios es mayor.

7. Conclusiones

Puede concluirse que los mapas de aptitud obtenidos con el esquema FAO modificado y el análisis de punto ideal son sensibles al método de evaluación empleado. Dado que los criterios de evaluación empleados y las personas que realizaron la evaluación fueron los mismos en los dos métodos, es evidente que la disparidad de resultados es debida al diferente modo de puntuación y combinación de los factores. Mientras en el método FAO, a pesar de ser aparentemente cuantificado, la puntuación de los factores se realiza por asignación cualitativa, en el análisis de punto ideal la única valoración cualitativa se realiza en la ponderación de los factores, que además es facilitada mediante la aplicación del AHP, que ayuda al evaluador a transformar una valoración

cuantitativa en una escala numérica. Por ello, a pesar de que la determinación de la aptitud del territorio presenta siempre un elevado grado de subjetividad derivado de los valores, objetivos e intereses de los agentes decisores, las técnicas de evaluación multicriterio proporcionan un procedimiento sistemático y cuantificado que contribuye a reducir la subjetividad, frente a otros métodos más cualitativos como el esquema FAO.

Dentro de la evaluación multicriterio, los métodos sencillos como el análisis de punto ideal son más fácilmente implementables en SIG que otras técnicas más complejas, basadas en la comparación de alternativas, que requieren un mayor tiempo de procesamiento informático. En este análisis la utilización de las métricas $p=1$, $p=2$ o $p=10$ depende del grado de riesgo que estemos dispuestos a asumir en la toma de decisiones. Para $p=10$ el riesgo será mínimo ya que se concede mayor relevancia a los criterios de evaluación más desfavorables, mientras que con la utilización de $p=1$ estos criterios pueden ser compensados. La distancia euclidiana ($p=2$) permite obtener mapas de aptitud intermedios, que representan una situación con compensación parcial entre criterios.

Los SIG son herramientas indispensables para la captura y análisis de la información geográfica necesaria para la evaluación de tierras. La implementación de las metodologías en un SIG raster permitió utilizar directamente las celdas raster como unidades cartográficas de evaluación. De este modo se consiguió una mayor precisión en los resultados que la que se habría obtenido empleando otras unidades de evaluación de mayor superficie.

La evaluación de tierras permite identificar las potencialidades intrínsecas del territorio y localizar las zonas con mayor aptitud para un determinado aprovechamiento. Esto constituye la base para una planificación de los usos del suelo armónica con el entorno y orientada a un desarrollo sostenible. Estos mapas de aptitud son requeridos como información de partida en cualquier proceso de asignación espacial de usos del suelo, constituyendo una etapa fundamental en la ordenación del territorio. Es preciso prestar una mayor atención a esta etapa que, en la mayor parte de los casos, se limita a la consideración de factores biofísicos y a su combinación mediante una sencilla regla de decisión, frecuentemente la suma lineal ponderada, sin realizar ningún tipo de análisis de sensibilidad.

Referencias bibliográficas

- Baja, S., Chapman, D. M. y Dragovich, D. (2001): "Fuzzy modelling of environmental suitability index for rural land use systems: an assessment using a GIS", en *Proceedings of the 6th International Conference on GeoComputation*. GeoComputation CD-ROM. Brisbane, University of Queensland. <http://www.geocomputation.org/2001/papers/baja.pdf>
- Baja, S., Chapman, D. M. y Dragovich, D. (2002): "Using GIS-based continuous methods for assessing agricultural land-use potential in sloping areas", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29, pp. 3-20.
- Banai, R. (1993): "Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the Analytic Hierarchy Process", *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, 4, pp. 315-329.
- Barredo, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ed. Ra-Ma.

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Boixadera, J. y Porta, J. (1991): *Información de suelos y evaluación catastral. Método del valor índice*. Madrid, Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria, Ministerio de Economía y Hacienda.

Burrough, P. A. (1989): "Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation", *Journal of Soil Science*, 40, pp. 477-492.

Burrough, P. A., MacMillan, R. A. y Van Deursen, W. (1992): "Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography", *Journal of Soil Science*, 43, pp. 193-210.

California Department of Conservation (1997): *California agricultural land evaluation and site assessment model. Instruction manual*. California, California Department of Conservation. URL: <http://www.consrv.ca.gov/DLRP/LESA/lesamodl.pdf>

Cancela, J. J. (2003): *Gestión integrada del agua en la cuenca alta del río Miño*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería Agroforestal, EPS Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.

Carballeira, A., Devesa, C., Retuerto, R., Santillán, E. y Uceda, F. (1983): *Bioclimatología de Galicia*. La Coruña, Fundación Pedro Barrié de la Maza.

Carver, S. J. (1991): "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, 3, pp. 321-339.

Condon, R. W. (1968): "Estimation of grazing capacity on arid grazing lands", en Stewart, G. A. (Ed.): *Land evaluation: Papers of a CSIRO Symposium, organized in cooperation with UNESCO*. Melbourne, Macmillan of Australia, pp. 112-124.

Chen, K., Blong, R., Jacobson, C. (2001): "MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards", *Environmental Modelling & Software*, 16, pp. 387-397.

Davidson, D. A., Theocharopoulos, S. P. y Bloksma, R. J. (1994): "A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy set methodologies", *International Journal of Geographical Information Science*, 8, 4, pp. 369-384.

De la Rosa, D., Moreno, J. A., García, L. V. y Almorza, J. (1992): "MicroLEIS: A microcomputer-based Mediterranean land evaluation information system", *Soil Use and Management*, 8, pp. 89-96.

De Wit, C. T. y Van Keulen, H. (1987): "Modelling production of fields crops and its requirements", *Geoderma*, 40, pp. 253-265.

Diamond, J. T. y Wright, J. R. (1988): "Design of an integrated spatial information system for multiobjective land-use planning", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 15, pp. 205-214.

Díaz-Fierros, F. y Gil, F. (1984): *Capacidad productiva de los suelos de Galicia*. Santiago de Compostela, Universidad de Santiago de Compostela.

Dumanski, J. y Onofrei, C. (1989): "Techniques of crop yield assessment for agricultural land evaluation", *Soil Use and Management*, 5, 1, pp. 9-16.

Eastman, J. R. (1995): *Idrisi for windows, version 2 – User's guide*. Worcester, Clark University.

Eastman, J. R., Jiang, H. y Toledano, J. (1998): "Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS" en Beinat, E. y Nijkamp, P. (Eds.): *Multicriteria analysis for land-use management*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 227-251.

Engelen, G., Geertman, S., Smits, P. y Wessels, C. (1999): "Dynamic GIS and strategic physical planning support: a practical application to the IJmond / Zuid-Kennemerland region" en: Stillwell, J., Geertman, S. y Openshaw, S. (Eds.): *Geographical Information and Planning*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 87-111.

FAO (1976): *Esquema para la evaluación de tierras*. Roma, FAO.

- FAO (1983): *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. FAO Soils Bulletin nº 52*. Roma, FAO.
- FAO (1985a): *Guidelines: land evaluation for irrigation. FAO Soils Bulletin nº 55*. Roma, FAO.
- FAO (1985b): *Evaluación de tierras con fines forestales. Estudio FAO, Montes 48*. Roma, FAO.
- FAO (1993): *Guidelines for land-use planning. FAO Development Series*. Roma, FAO.
- Hall, G. B., Wang, F. y Subaryono (1992): "Comparison of Boolean and fuzzy classification methods in land suitability analysis by using geographical information systems", *Environment and Planning A*, 24, pp. 497-516.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J. y Ritchie, J. T. (2003): "The DSSAT cropping system model", *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 235-265.
- Jun, Ch. (2000): "Design of a intelligent geographic information system for multi-criteria site analysis", *URISA Journal*, 12, 3, pp. 5-17.
- Klingebiel, A. A., Montgomery, P. H. (1961): *Land capability classification. USDA Agricultural Handbook 210*. Washington DC, US Government Printing Office.
- Laborate-EIDO. (2003): *Estudios de ordenación productiva agraria en 17 comarcas de la comunidad autónoma de Galicia*. Documento inédito.
- Malczewski, J. (1996): "A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making", *Journal of Geographical Information Systems*, 10, 8, pp. 955-971.
- McCormack, R. J. (1971): "The Canada Land Use Inventory: a basis for land use planning", *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, 4, pp. 141-146.
- Mendoza, G. A. (1997): "A GIS-based multicriteria approaches to land use suitability assessment and allocation" en: *Seventh Symposium on systems analysis in forest resources*. Traverse City, USDA Forest Service. URL: <http://www.ncrs.fs.fed.us/pubs/gtr/other/gtr-nc205/landuse.htm>.
- Ministerio de Agricultura. (1974): *Caracterización de la capacidad agrológica de los suelos de España. Metodología y normas*. Madrid, Ministerio de Agricultura.
- Miranda, D. (2002): *Caracterización y evaluación de la concentración parcelaria en Galicia. Propuesta de un procedimiento integrado de ordenación rural basado en métodos avanzados de SIG, fotogrametría digital y análisis multivariante*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería Agroforestal, EPS Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Pereira, J. M. C., Duckstein, L. (1993): "A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation", *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, 5, pp. 407-424.
- Pierce, F. J., Larson, W. E., Dowdy, R. H. y Graham, W. A. P. (1983): "Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion", *Journal of Soil and Water Conservation*, 38, pp. 39-44.
- Ridgley, M. A. y Heil, G. W. (1998): "Multicriteria planning of protected-area buffer zones: an application to Mexico's Izta-Popo national park", en Beinart, E., Nijkamp, P. (Eds.): *Multicriteria analysis for land-use management*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 293-309.
- Sánchez, P. A., Couto, W. y Buol, S. W. (1982): "The fertility capability classification system: Interpretation, applicability and modification", *Geoderma*, 27, pp. 283-309.
- Sánchez, P. A., Palm, C. A. y Buol, S. W. (2003): "Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics", *Geoderma*, 114, pp. 157-185.
- SDC-Xunta de Galicia. (2003): "Mapa de coberturas e usos do solo de Galicia". CD-ROM.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M. y Nelson, R. (2003): "CropSyst, a cropping system simulation model", *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 289-307.

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

- Storie, R. E. (1933): *An index for rating the agricultural value of soils*. Berkeley, University of California.
- Storie, R. E. (1970): *Manual de evaluación de suelos*. México, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
- Tang, H., Debaveye, J., Ruan, D. y Van Ranst, E. (1991): "Land suitability classification based on fuzzy set theory", *Pedologie*, 41, 3, pp. 277-290.
- Triantafyllis, J., Ward, W. T. y McBratney, A. B. (2001): "Land suitability assessment in the Namoi Valley of Australia, using a continuous model", *Australian Journal of Soil Research*, 39, pp. 273-290.
- Van Diepen, C. A., Van Keulen, H., Wolf, J. y Berkhout, J. A. A. (1991): "Land evaluation: from intuition to quantification", en Stewart, B. A. (Ed.): *Advances in soil science*. New York, Springer-Verlag, pp. 139-204.
- Van Ranst, E., Tang, H., Groenemans, R. y Sinthurahat, S. (1996): "Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand", *Geoderma*, 70, pp. 1-19.
- Wang, F. (1994): "The use of artificial neural networks in a geographical information system for agricultural land-suitability assessment", *Environment and Planning A*, 26, pp. 265-284.
- Weerakon, K. G. P. K. (2002): "Integration of GIS based suitability analysis and multicriteria evaluation for urban land use planning; contribution from the Analytic Hierarchy Process", en: *3rd Asian Conference on Remote Sensing*. Nepal, Asian Association on Remote Sensing.
- Yialouris, C. P., Kollias, V., Lorentzos, N. A., Kalivas, D. y Sideridis, A. B. (1997) : "An integrated expert geographical information system for soil suitability and soil evaluation", *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1, 2, pp. 89-99.

TABLAS

Tabla 1. Definición de los tipos de utilización de la tierra 'maíz' y 'eucalipto'

Uso	Maíz	Eucalipto
Producto	Maíz para consumo en verde o ensilado	Madera de eucalipto
Orientación comercial	Alimentación del ganado de la propia explotación o comercialización en circuitos intracomarcales	Industria celulósica, de parquet o de tableros de fibras
Nivel tecnológico	Medio-alto	Bajo
Infraestructuras requeridas	Es favorable la existencia de concentración parcelaria	-
Prácticas de cultivo	Siembra. Aporte de fertilizantes. Tratamientos fitosanitarios. Recolección.	Limpieza. Marcación de líneas. Subsulado. Plantación. Abonado. Limpieza entre líneas.
Producción media	50 Tn/ha	250 m ³ /ha
Intensidad de capital	Media	Muy baja
Intensidad de mano de obra	Baja	Muy baja
Conocimientos técnicos	Medio-bajo	Medio-bajo
Impacto ambiental	Medio-bajo	Alto-muy alto
Inputs	Enmienda caliza, semillas, purín, fertilizantes minerales y tratamientos herbicidas e insecticidas.	Plantas y abono mineral

Fte. Elaboración propia sobre datos de Laborate-EIDO (2003)

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Requerimientos de los usos y cualidades de la tierra

Requerimientos		Cualidad de la tierra
Iniciales	Disponibles	
Requerimientos agronómicos	Requerimientos agronómicos	
Régimen de temperatura	Bioclimatología	Intensidad bioclimática libre (Carralera et al., 1983)
Régimen de radiación		
Tolerancia a las heladas	Aptitud para la mecanización, posibilidad de enraizamiento y riesgo de erosión	Capacidad productiva de los suelos de Galicia (Díaz-Fierros y Gil, 1984)
Disponibilidad de agua		
Tolerancia al encharcamiento		
Disponibilidad de oxígeno	Régimen hídrico	Capacidad productiva (Díaz-Fierros y Gil, 1984)
Fertilidad		
Posibilidad de enraizamiento	Requerimientos de manejo	
Salinidad, sodicidad, toxicidades	Nivel de mecanización	Nº de máquinas por explotación (Censo Agrario 99)
Requerimientos de manejo	Requerimientos estructurales	Superficie municipal con concentración parcelaria (Miranda, 2002) Superficie parcela catastral Densidad de la red viaria Infraestructuras de riego (Cancela, 2003)
Aptitud para la mecanización		
Nivel tecnológico/mechanización		
Requerimientos estructurales		
Base territorial de la explotación		
Localización		
Comercialización		
Existencia industria agroforestal	Localización	Distancia a red viaria
Existencia reforestaciones		Distancia a mercados
Requerimientos socioeconómicos	Comercialización	Nº explotaciones que comercializan (Censo Agrario 99)
Intensidad de mano de obra		
Intensidad de capital	Existencia industria agroforestal	Nº de agroindustrias (Censo Agrario 99)
Nivel de formación técnica		
Actitud	Existencia reforestaciones	Superficie municipal reforestada (Miranda, 2002)
Grado de asociacionismo		
Requerimientos ambientales	Requerimientos socioeconómicos	
Impacto ambiental	Intensidad de mano de obra	Inscritos en el Régimen Especial Agrario
Impacto paisajístico		
Distribución actual del uso	Intensidad de capital	Margen Bruto explotaciones (Censo Agrario 99)
	Nivel de formación técnica	Titulares con formación teórica (Censo Agrario 99)
	Grado de asociacionismo	Nº socios cooperativas/SATs
	Impacto ambiental	Red Natura 2001
	Distribución actual del uso	Mapa de usos (SDC, 2003) Mapa Forestal España III

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Características generales de los principales sistemas de evaluación de tierras

	Finalidad	Usos considerados	Información requerida	Procedimiento	Resultados
Esquema FAO	Aptitud	Usos específicos	Física Socioeconómica	Cuantitativo/cualitativo	5 clases de aptitud
Clasificación capacidad de la tierra del USDA	Capacidad	Uso agrario general	Física	Cualitativo	8 clases de aptitud
Sistema de aptitud para regadío del USBR	Capacidad	Proyectos de regadío	Física Económica	Cualitativo	6 clases de aptitud
Índices paramétricos	Capacidad	Uso agrario general	Física	Cuantitativo	Mapa aptitud continuo
LESA	Capacidad	Uso agrario general	Física Socioeconómica	Cuantitativo	Mapa aptitud continuo
FCC	Capacidad	Uso agrario general	Física	Cualitativo	Varias clases de aptitud
AEZ	Aptitud	Cultivos específicos	Física	Cuantitativo/cualitativo	5 clases de aptitud
Modelos dinámicos de simulación de cultivos	Aptitud	Cultivos específicos	Física	Cuantitativo	Rendimiento cultivos
Métodos <i>fuzzy</i>	Aptitud	Usos específicos	Física	Cuantitativo	Mapa aptitud continuo
Sistemas expertos	Ambas	Variable	Variable	Cualitativo	Varias clases de aptitud
Evaluación multicriterio	Ambas	Variable	Variable	Cuantitativo	Mapa aptitud continuo

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. Puntuación de la limitación de las cualidades de la tierra

Grado de limitación	Descripción	Puntuación
Ninguno	La característica es óptima para ese uso del suelo	0
Débil	La característica es casi óptima	1
Moderado	La característica tiene una influencia moderada en la viabilidad de un uso sostenido	3
Severo	La característica tiene una influencia en la disminución del rendimiento, de la viabilidad del uso o en la degradación del suelo tal que ese uso de la tierra resulta marginal	9
Muy severo	La limitación disminuye los rendimientos por debajo del nivel rentable o provoca un gran riesgo de degradación o puede incluso prohibir totalmente ese uso del suelo	27

Fte. Modificado de Triantafyllis et al. (2001)

Tabla 5. Puntuación del grado de limitación de tres cualidades de la tierra para el uso 'maíz' en las 36 encuestas

Uso	MAÍZ						
	Valor	Nº encuestas con puntuación limitación					Valor más frecuente
		0	1	3	9	27	
Concentración parcelaria ¹	MA	36					0
	A	22	14				0
	M	3	17	16			1
	B		4	8	17	7	9
	MB		1	2	6	27	27
Nº agroindustrias	MA	36					0
	A	32	4				0
	M	14	18	4			1
	B	11	1	20	4		3
	MB	11		3	12	10	9
Distribución actual del uso ²	10			4	4	28	27
	11			2	6	28	27
	12			1	5	30	27
	13			1	3	32	27
	14			1	5	30	27
	20	3	3	15	10	5	9
	21		2	2	19	13	9
	22		3	3	16	14	9
	23	2	6	18	9	1	3
	24			6	20	10	9
	29	27	8	1			0
	33	3	19	8	6		1
	34	8	21	7			1
	35	25	6	5			0
	37			2	7	27	27
	39		23	10	3		1
	40		18	13	5		1
	42	8	19	6	3		1
	45	19	14	3			0
60	3	14	10	9		1	
46	19	9	8			0	

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Tabla 6. Evaluación de las cualidades de la tierra para el uso 'maíz'

Uso del suelo MAÍZ	Grado de limitación Puntuación limitación	Ninguno 0	Débil 1	Moderado 3	Severo 9	Muy severo 27
Aptitud para la mecanización, posibilidad de enraizamiento y riesgo de erosión		A, B, c ³	C	D, d	E	F, G
Régimen hídrico		4, 5 ¹	6	7	3, 8	1, 2, 9
Nivel de mecanización						
- nº de máquinas/explotación		MA ⁴ , A	M	B		MB
Requerimientos estructurales						
- sup. concentración parcelaria		MA, A	M		B	MB
- tamaño de la parcela		MA, A	M		B	MB
- accesibilidad (m lineales/m2)		MA, A	M		B	MB
Localización						
- distancia a mercados		MA-MB				
- distancia a red viaria		MA-MB				
Comercialización						
- nº explotaciones comercializan		MA-M	B	MB		
Agroindustria						
- nº agroindustrias		MA, A	M	B	MB	
Intensidad de mano de obra						
- % inscritos en REAs/población		MA, A	M	B	MB	
Intensidad de capital						
- MBT medio de las explotaciones		MA, A	M	B	MB	
Nivel de formación técnica						
%titulares con formación teórica		MA-M	B	MB		
Grado de asociacionismo						
- nº socios de cooperativas y SATs		MA, A	M		B	MB
Distribución actual del cultivo		29 ⁵ , 35, 45, 46	33, 34, 39, 40, 42, 60	20, 23	21, 22, 24	10, 11, 12, 13, 14, 37

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

Tabla 7. Evaluación de las cualidades de la tierra para el uso 'eucalipto'

Uso del suelo MAÍZ	Grado de limitación Puntuación limitación	Ninguno 0	Débil 1	Moderado 3	Severo 9	Muy severo 27
Intensidad Bioclimática Libre				MA		MB
Aptitud para la mecanización, posibilidad de enraizamiento y riesgo de erosión		E	D, F	d	C	A, B, c, G
Requerimientos estructurales						
- tamaño de la parcela		MA, A		M	B	MB
- accesibilidad (m lineales/m ²)		MA, A	M		B	MB
Industrias agroforestales						
- nº industrias forestales		MA	A	M	B	MB
Existencia reforestaciones						
- superficie reforestada		MA	A	M	B	MB
Impacto ambiental						
- zonas protegidas Red Natura						RN
Distribución actual del uso						
- mapa de usos del suelo (SITGA)		12, 14	13, 22, 37	20, 23, 24, 40, 60	11, 21, 34, 42	10, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 39, 45, 46
- mapa forestal de España III		Forestal productor rápido	Monte desarbolado	Forestal productor lento		Agrícola y forestal protector

Tabla 8. Factores de evaluación de la aptitud de la tierra para el uso 'eucalipto'

Factor	Rango de valores
Intensidad Bioclimática Libre	6,5-8,5 u.b.c.; 8,5-10,5 u.b.c.
Aptitud para la mecanización, posibilidad de enraizamiento y riesgo de erosión	A, B, C, c, D, d, E, F, G
Tamaño de la parcela	0,04 – 745 ha
Accesibilidad (m lineales red viaria/m ²)	0 – 0,011 m/m ²
Nº industrias forestales en el municipio	0 – 3
Superficie reforestada en el municipio	0,23 – 2,97 %
Zonas protegidas bajo Red Natura	Sí, No
Distribución actual del uso (SITGA)	10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 29, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 45, 46, 60
Mapa forestal de España III	Forestal productor rápido, forestal productor lento, forestal protector, monte desarbolado, agrícola

Tabla 9. Factores de evaluación de la aptitud de la tierra para el uso 'maíz'

Factor	Rango de valores
Aptitud mecanización, enraizamiento y riesgo erosión	A, B, C, c, D, d, E, F, G
Régimen hídrico	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
Nº máquinas/explotación en el municipio	0,91 – 3,78
Superficie con concentración parcelaria en la parroquia	0 – 100 %
Tamaño de la parcela	0,04 – 745 ha
Accesibilidad (m lineales red viaria/m ²)	0 – 0,011 m/m ²
Distancia a mercados ⁶	Muy baja, baja, media, alta, muy alta
Distancia a red viaria ⁷	Muy baja, baja, media, alta, muy alta
Nº explotaciones que comercializan/km ²	1,51 – 5,85
Nº agroindustrias/municipio	0 – 15
Inscritos Régimen Especial Agrario por parroquia s/población	0,39 – 39,24 %
Margen Bruto Total medio de las explotaciones del municipio	2159 – 10526 €
Titulares con formación teórica en el municipio	1,13 – 23,66 %
Nº socios de cooperativas y SATs en la parroquia	0 – 80
Distribución actual del cultivo	10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 29, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 45, 46, 60

FIGURAS

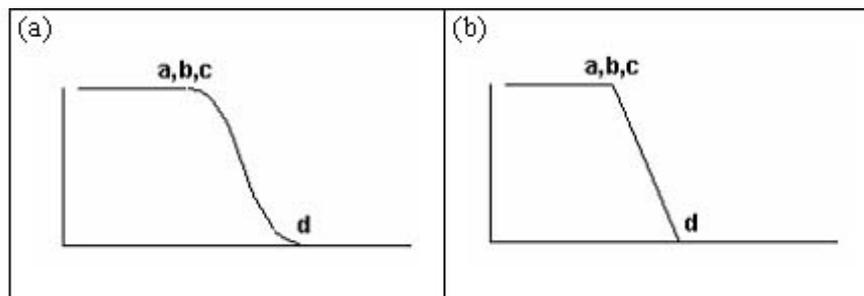


Figura 1. Geometría de las funciones sigmoideal (a) y lineal (b).

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

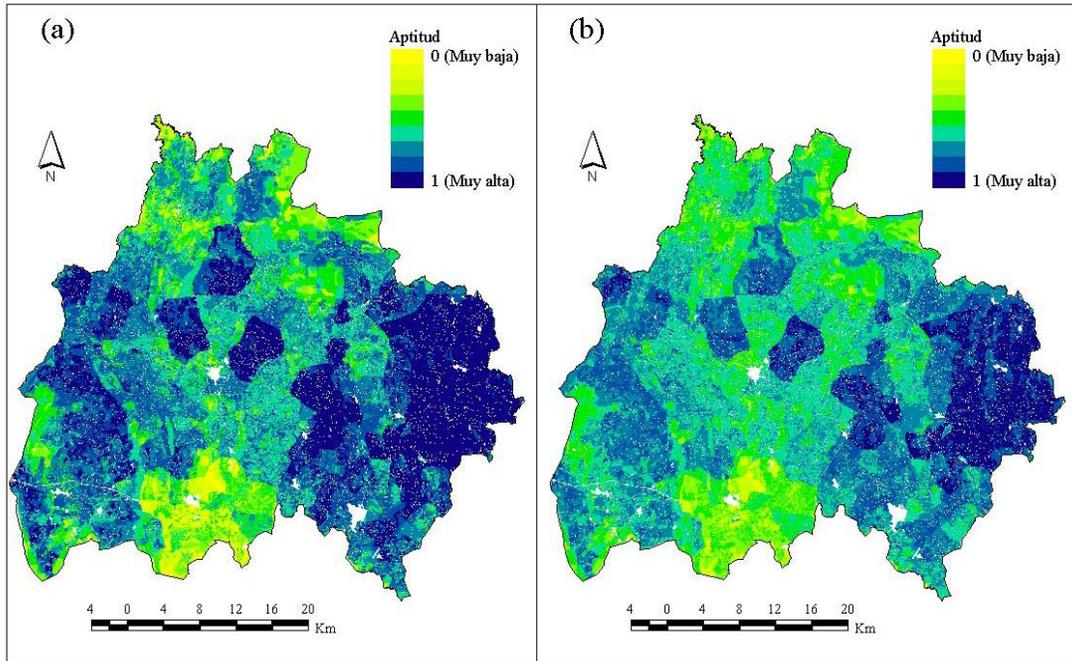


Figura 2. Mapas de aptitud para el cultivo de maíz obtenidos mediante puntuación de la limitación y función de pertenencia sigmoideal (a) y lineal (b).

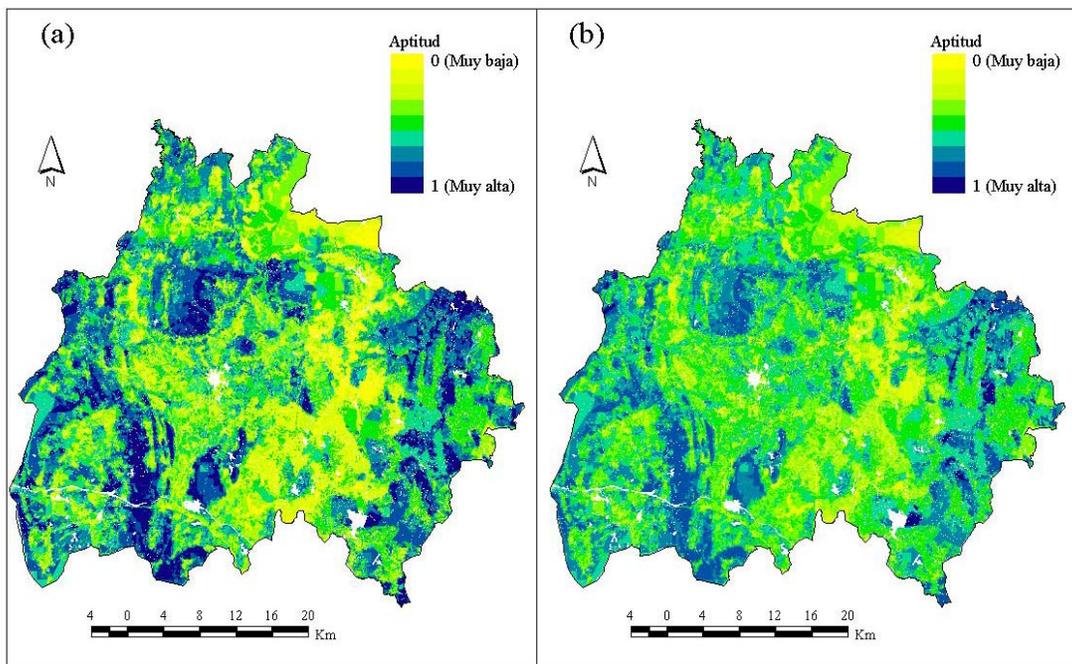


Figura 3. Mapas de aptitud para el eucalipto obtenidos mediante puntuación de la limitación y función de pertenencia sigmoideal (a) y lineal (b).

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

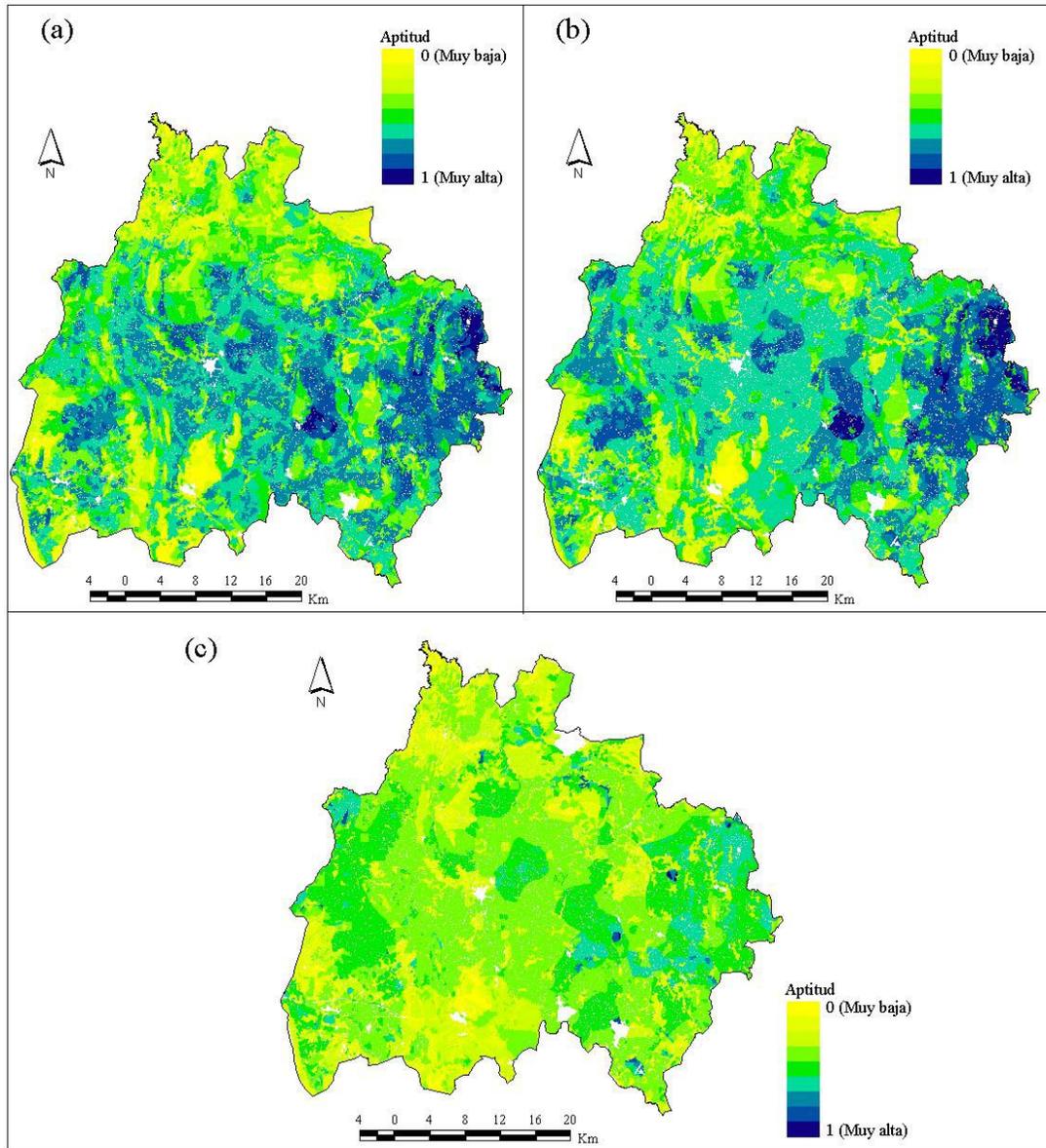


Figura 4. Mapas de aptitud para el maíz obtenidos mediante el análisis de punto ideal para $p=1$ (a), $p=2$ (b) y $p=10$ (c).

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

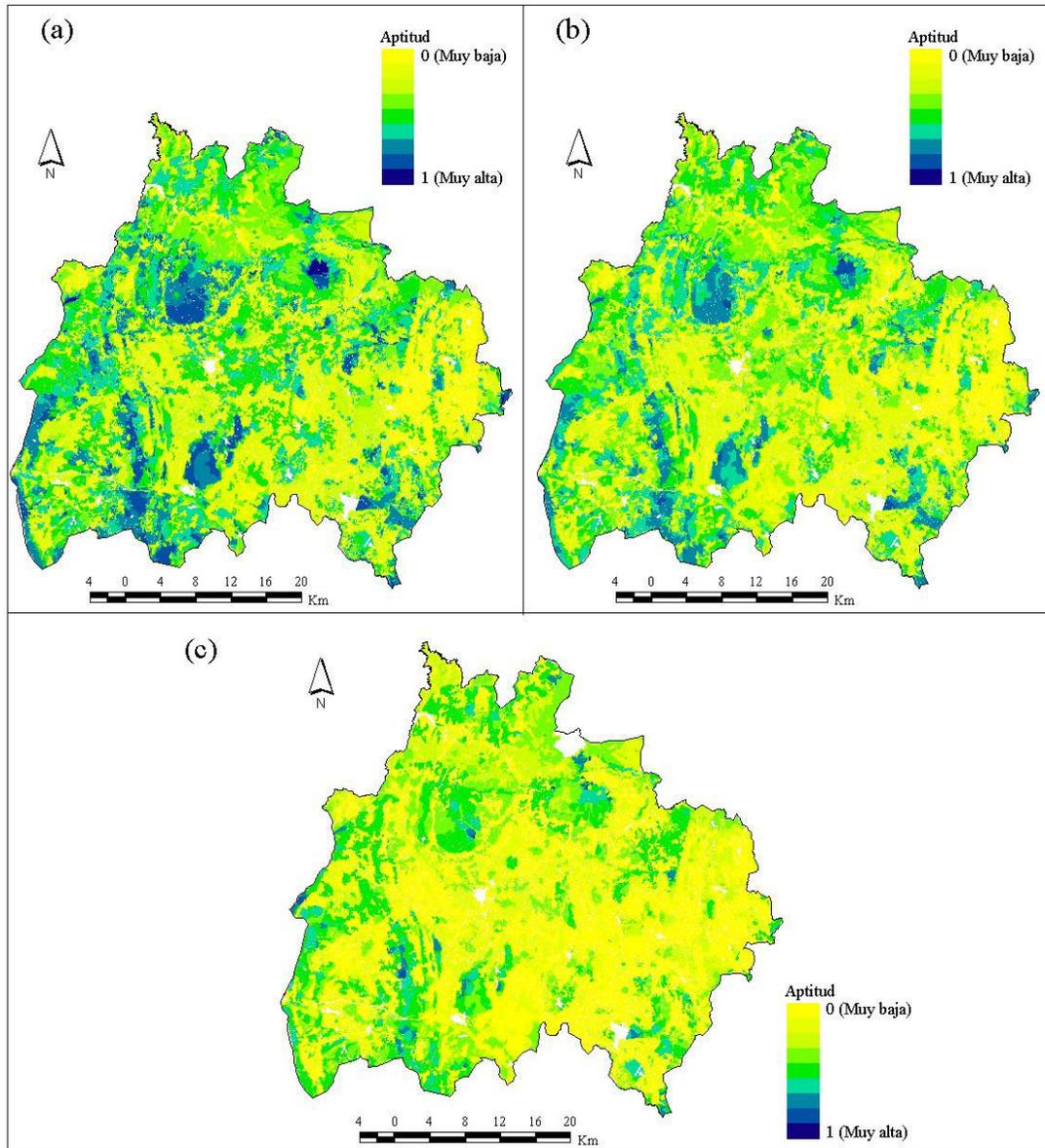


Figura 5. Mapas de aptitud para el eucalipto obtenidos mediante el análisis de punto ideal para $p=1$ (a), $p=2$ (b) y $p=10$ (c).

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales". *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

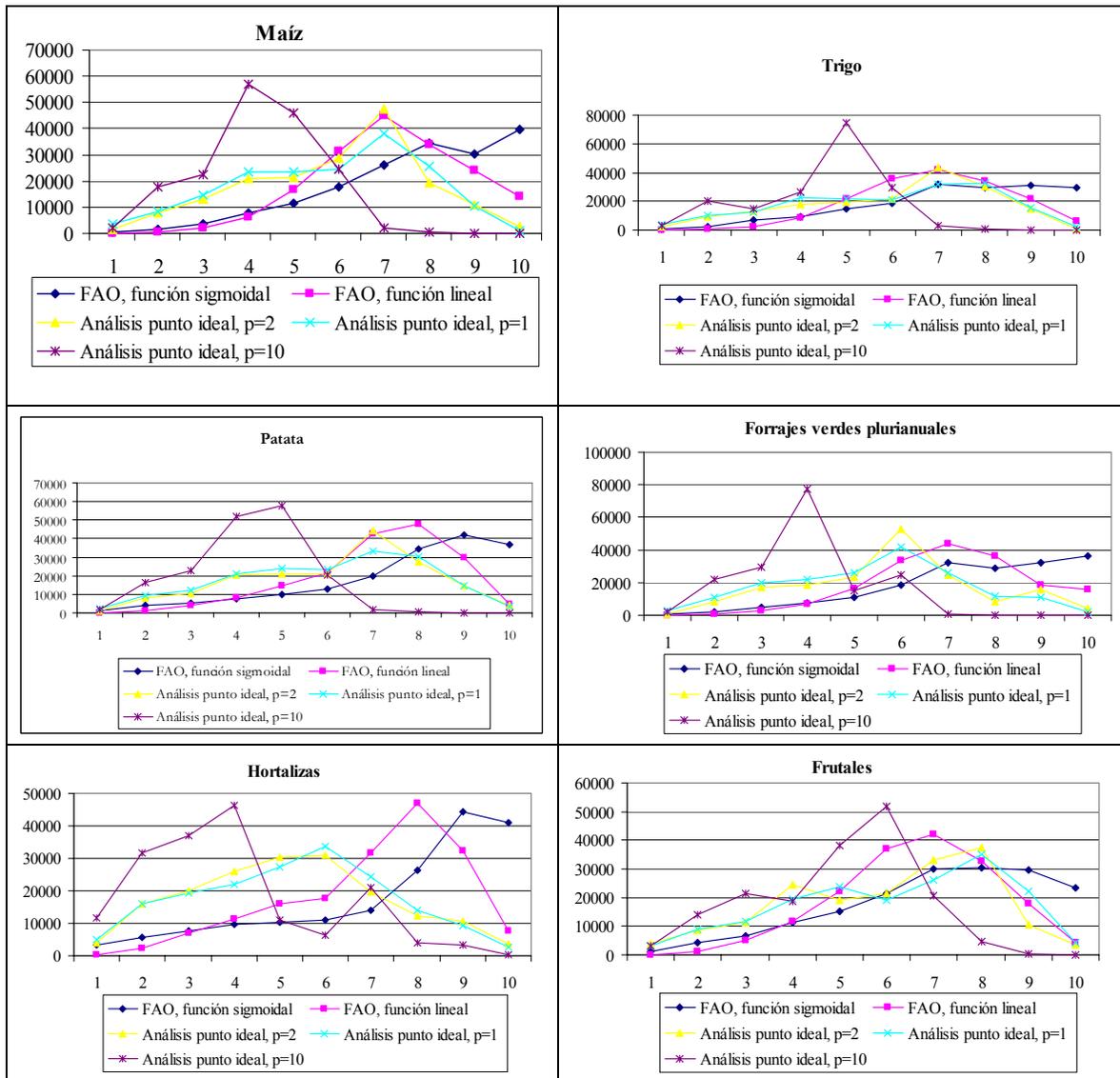


Figura 6. Superficie (ha) de las 10 clases de aptitud según los distintos métodos para los usos: maíz, trigo, patata, forrajes plurianuales, hortalizas y frutales.

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005): "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 40-68. ISSN: 1578-5157

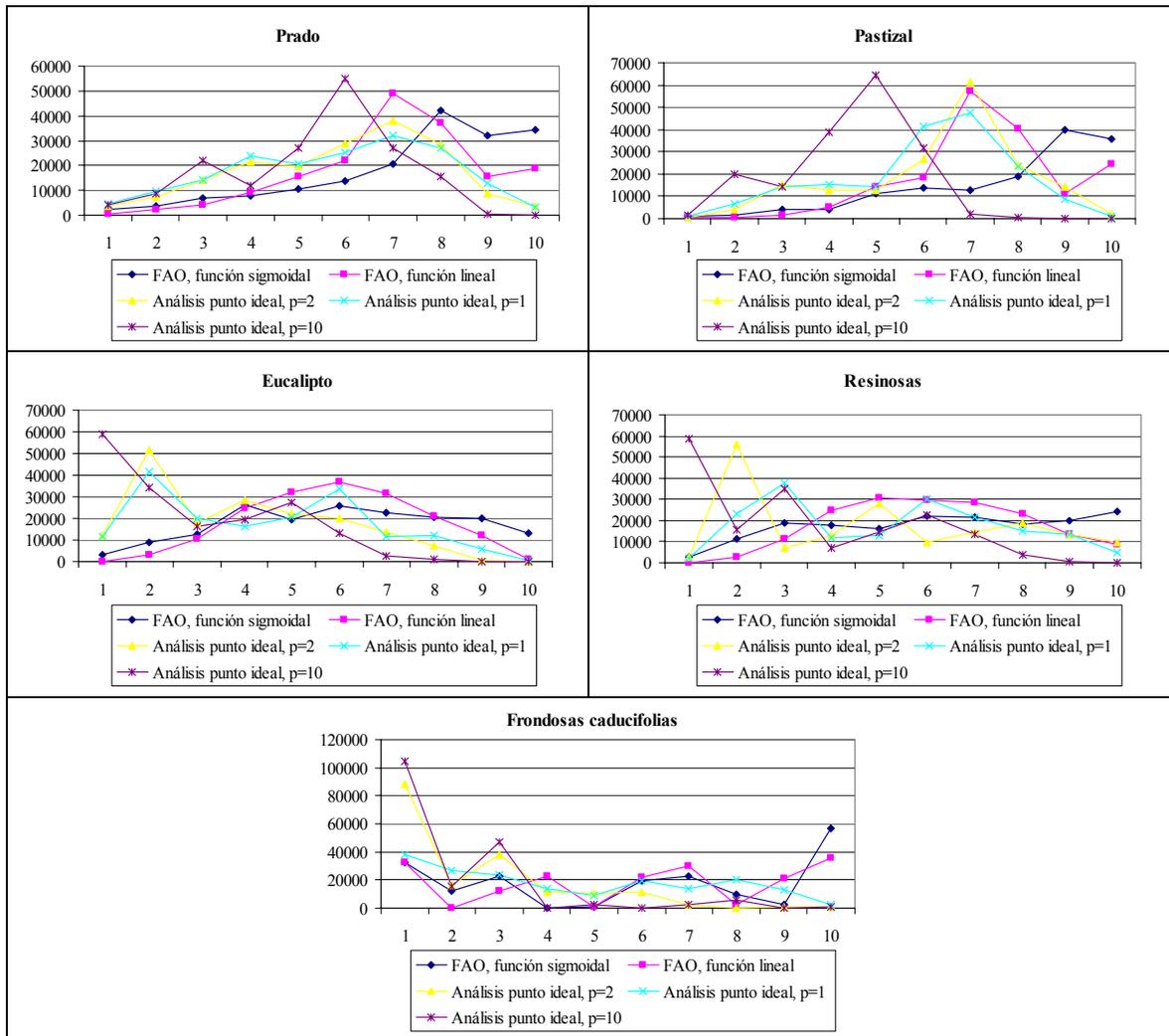


Figura 7. Superficie (ha) de las 10 clases de aptitud según los distintos métodos para los usos: prado, pastizal, eucalipto, resinosas y frondosas caducifolias.

¹ Los valores numéricos de estos factores fueron reclasificados en cinco grupos para facilitar su puntuación; MA (muy alto), A (alto), M (medio), B (bajo), MB (muy bajo)

² 29 (cultivos forrajeros y otros cultivos), 35 (cultivos forrajeros), 45 (prados y cultivos anuales), 46 (prados), 33 (cultivos forrajeros y caducifolias), 34 (cultivos forrajeros y matorral), 39 (prados, cultivos anuales y caducifolias), 40 (prados, cultivos anuales y especies madereras), 42 (prados, cultivos anuales y matorral), 60 (cultivos forrajeros y especies madereras), 20 (matorral), 23 (matorral y pastizal), 21 (matorral y caducifolias), 22 (matorral y especies madereras), 24 (matorral y pastizal con roca) 10 (caducifolias), 11 (caducifolias y pino), 12 (eucalipto), 13 (eucalipto, pino y caducifolias), 14 (eucalipto y pino), 37 (pino).

³ Díaz-Fierros y Gil (1984)

⁴ Los valores numéricos de estos factores fueron reclasificados en cinco grupos para facilitar su puntuación; MA (muy alto), A (alto), M (medio), B (bajo), MB (muy bajo)

⁵ 29 (cultivos forrajeros y otros cultivos), 35 (cultivos forrajeros), 45 (prados y cultivos anuales), 46 (prados), 33 (cultivos forrajeros y caducifolias), 34 (cultivos forrajeros y matorral), 39 (prados, cultivos anuales y caducifolias), 40 (prados, cultivos anuales y especies madereras), 42 (prados, cultivos anuales y matorral), 60 (cultivos forrajeros y especies madereras), 20 (matorral), 23 (matorral y pastizal), 21 (matorral y caducifolias), 22 (matorral y especies madereras), 24 (matorral y pastizal con roca) 10 (caducifolias), 11 (caducifolias y pino), 12 (eucalipto), 13 (eucalipto, pino y caducifolias), 14 (eucalipto y pino), 37 (pino).

⁶ Muy baja (<10 Km. a mercados de nivel superior o <2,5 Km. a mercados de nivel intermedio), baja (5-10 Km. a mercados de nivel superior o 2,5-5 Km. a mercados de nivel intermedio o <5 Km. a mercados de nivel base), media (10-15 Km. a un mercado de nivel superior y 5-10 Km. a un mercado de nivel intermedio, o 10-15 Km. a un mercado de nivel superior y 5-10 Km. a un mercado de nivel base, o 5-10 Km. a un mercado de nivel intermedio y 5-10 Km. a un mercado de nivel base), alta (10-15 Km. a mercados de nivel superior o 5-10 Km. a mercados de nivel intermedio o 5-10 Km. a mercados de nivel base), muy alta (>15 Km. a mercados de nivel superior y >10 Km. a mercados de nivel intermedio y >10 Km. a mercados de nivel base)

⁷ Muy baja (<1 Km. a autovía o <500 m a red estatal), baja (1-2 Km. a autovía o 0,5-1 Km. a red estatal o <500 m a red primaria), media (0,5-1 Km. a red primaria o <500 m a red secundaria), alta (0,5-1 Km. a red secundaria), muy baja (resto de los casos)