

PROPUESTA DE UN MODELO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA INCORPORACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA EN SUELOS AGRÍCOLAS

YOLANDA PÉREZ ALBERT¹, ODA CADIACH RICOMA^{1,2}, ANA PASSUELLO² y MARTA SCHUHMACHER².

¹Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili.
Av. Catalunya 35, 43002 Tarragona, España.

²Departament d'Enginyeria Química. Universitat Rovira i Virgili.
Av. Països Catalans 26, 43007 Tarragona, España.
myolanda.perez@urv.cat

RESUMEN

Como resultado de la expansión urbanística e industrial ha aumentado la producción de lodo derivado de la depuración de aguas residuales. En el 2008, Cataluña generó 139.300 toneladas de materia seca de lodo, entre las cuales, el 83% fue utilizado en campos agrícolas. El volumen de residuos incorporados a la agricultura como fertilizantes y las posibles consecuencias que éstos pueden generar en el ámbito social y medioambiental hacen del todo necesario diseñar un modelo eficiente para su gestión. El presente estudio pretende desarrollar una propuesta de modelo de evaluación multicriterio (EMC) que permita ponderar las áreas más adecuadas para la incorporación de lodos de depuradora tratados en suelo agrícola. Para su implementación se ha utilizado la técnica Logic Scoring of Preferences LSP (Puntuación Lógica de Preferencias) junto con tecnología SIG.

Palabras clave: evaluación multicriterio, lodos tratados, SIG, LSP.

PROPOSAL OF MULTICRITERIA DECISION ANALYSIS FOR THE INCORPORATION OF SEWAGE SLUDGE ON AGRICULTURAL FIELDS.

ABSTRACT

Owing to urban and industrial expansion, the production of sewage sludge (SS) derived from wastewater treatment has increased. In 2008, Catalonia generated 139,300 tonnes of SS (dry weight), between those 83% were disposed in agricultural fields. The amount of SS incorporated into agriculture as a fertilizer and the possible consequences that this could produce in social and environmental spheres lead to the necessity of developing an efficient management model. This study aims to develop a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) to identify suitable agricultural

areas to amend with sewage sludge. For its implementation the Logic Scoring of Preferences (LSP) technique, together with GIS technology have been applied.

Key words: Multicriteria Decision Analysis (MCDA), sewage sludge, GIS, LSP.

1. Introducción

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden definirse como un "sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión" (NCGIA: National Center for Geographic Information and Analysis). Esta tecnología, nacida en los años 60, se ha ido desarrollando y ha incorporado nuevas técnicas que han permitido avanzar en el campo del análisis espacial. Una de ellas es la Evaluación Multicriterio (EMC) que engloba a un conjunto de herramientas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Gómez-Delgado y Barredo, 2005; Malczewski, 1999) en los que se valoran las diversas alternativas determinadas por múltiples criterios y objetivos que se encuentran en conflicto (Voogd, 1983). La razón fundamental de esta integración (SIG y EMC) es que aúna la capacidad que tienen los SIG para almacenar y gestionar información geográfica referenciada y la eficiencia de la EMC como instrumento para modelar problemas de decisión. En este sentido, la ordenación del territorio implica la toma de decisiones por parte de los agentes responsables los cuales introducen una dosis importante de subjetividad. Según M.T. Lamelas (2008), "las metodologías de evaluación multicriterio han hecho un gran esfuerzo para introducir tanta objetividad como es posible en un proceso altamente subjetivo".

Esas técnicas, las EMC integradas en un SIG, son aplicables a distintos campos de la ordenación del territorio donde se tienen en cuenta factores económicos, ecológicos y sociales para la elección de una alternativa idónea. Se pueden destacar algunos estudios de casos que abordan diversas cuestiones como la gestión y asignación de recursos, el análisis de aptitud y capacidad de la tierra y la evaluación de riesgos (Eastman *et al.*, 1993). En relación a la gestión de residuos, temática relacionada con el objetivo de este trabajo, encontramos escasas referencias aunque de gran interés como las de Bosque *et al.* (1999) y Gómez-Delgado (2004) que diseñan una metodología para la localización de centros de tratamiento de residuos. Este último estudio se ha completado (Gómez-Delgado y Tarantola, 2006) con un análisis de sensibilidad para valorar la robustez del modelo. Otra experiencia es la expuesta por Sumathi *et al.* (2007) en la que desarrollan un SIG con técnicas EMC para la localización de vertederos en India o la de Biotto *et al.* (2007), en la que se realiza un análisis espacial multicriterio y multifactor para evaluar la probabilidad de la aparición de vertederos ilegales utilizando como referencia las características de los ya existentes y aplicándolas al conjunto del territorio.

El presente estudio pretende diseñar y ejecutar un modelo EMC que pueda utilizarse como referencia en el proceso de incorporación de lodos de depuradora tratados en suelo agrícola. Para su implementación se ha utilizado la técnica Logic Scoring of Preferences LSP (Puntuación Lógica de

Preferencias) (Dujmović, 2007), ya que presenta la ventaja sobre otras del mismo tipo de evaluar las diferentes alternativas introduciendo un número elevado de criterios con series largas de datos.

2. Objetivos, área de estudio y fuentes

2.1. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es definir una metodología eficaz para la generación de un modelo EMC que sea capaz de determinar la adecuación del territorio respecto a la incorporación de lodos tratados procedentes de depuradoras. El modelo desarrollado se centra en Cataluña y ofrecerá como producto final un mapa que muestre la idoneidad o la capacidad de acogida del territorio en relación a la introducción de lodos tratados como fertilizante agrícola. Para ello se utilizarán variables de carácter social y medioambiental, con la intención de minimizar los posibles impactos negativos tanto en la población como en el medioambiente.

Para la obtención de este objetivo principal será necesario, en primer lugar, determinar los criterios que definen la idoneidad del territorio para la incorporación de los lodos teniendo en cuenta la reducción del impacto medioambiental y social. En segundo lugar se obtendrá una base de datos cartográfica de cada uno de los criterios anteriores para lo cual se realizarán procesos de tratamiento, homogeneización y normalización de la información. En tercer lugar, se elaborará un modelo teórico de toma de decisión en el que se determinarán las reglas de decisión y pesos entre los diferentes criterios a partir del cuál se obtendrán los diferentes mapas de impacto sobre la población y el medio ambiente. En cuarto y último lugar, se aplicará el modelo EMC a la zona de estudio obteniendo como resultado un mapa síntesis en el que se muestran las alternativas existentes clasificadas en función de su nivel de idoneidad.

2.2. Planteamiento del problema y área de estudio

El Real Decreto 1310/1990 que regula la utilización de los lodos de depuración del sector agrario, plantea la importancia creciente de la producción de lodos y la problemática generada para su almacenamiento o reutilización. Además, este documento considera que estos son una fuente de materia orgánica y de fertilizantes útiles en la actividad agraria, vía más adecuada para su eliminación ya que permite incorporarlos a los ciclos naturales de la materia y energía. Los lodos de depuradora son la parte residual que proviene del tratamiento de depuración de las aguas sucias o residuales. Una vez han pasado por las EDAR (Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales) o las plantas de postratamiento se obtiene el lodo tratado. Este lodo presenta unas características de estabilización, higienización y reducción de su masa y volumen, que facilita su gestión y condiciona el futuro aprovechamiento que se le dará. Las principales utilidades son como fertilizante en agricultura o como uso energético en plantas cementeras. Cuando no puede reutilizarse (debido a sus niveles de toxicidad) se deposita en vertederos. La tendencia al incremento de la producción de estos materiales genera la necesidad de mejorar su gestión para intentar el mayor aprovechamiento en usos posteriores (agricultura y cementeras) y reducir la cantidad destinada a los vertederos.

La Comunidad Autónoma de Cataluña, situada al noreste del país y bañada por el Mar Mediterráneo, tiene una extensión de unos 32.000 km² y más de 7 millones de habitantes. Está configurada por una morfología variada con una zona muy montañosa al norte, donde se encuentra la sierra de los Pirineos (que alcanza hasta los 3000 metros de altura), y en el centro por la depresión central articulada a partir del río Ebro. La zona costera aparece modelada por una franja ligeramente montañosa marcada por el conjunto de sierras litorales y prelitorales. La población se concentra en las ciudades capitales de comarca, en las zonas urbanas litorales y sobre todo en el área metropolitana de la capital catalana, Barcelona.

El sector servicios es el que contribuye en mayor medida a la configuración del PIB de Cataluña con, aproximadamente, el 68 % del total en el año 2008. Le sigue la industria y energía con alrededor del 20 % y la construcción con el 10%. El peso de la agricultura es muy reducido dado que su aportación es inferior al 1% (IDESCAT, 2009). Debido al incremento de población y la expansión urbanística e industrial se ha generado un aumento de producción de lodos derivado de la depuración de las aguas residuales fruto del uso doméstico, urbano y agroindustrial que plantea serios problemas para su almacenamiento o gestión. En el año 2008 Cataluña produjo 139.300 toneladas de materia seca de lodo; su destino final se repartió de forma que el 83% fue a la agricultura, el 7% a cementeras y 10% restante se depositó en vertederos. En el escenario productivo expuesto se tiene que la mayor parte del lodo depurado proviene de las áreas urbanas, mientras que éste únicamente se podrá distribuir sobre una zona potencial del 28% del total de Cataluña, la formada por el conjunto de tierras cultivadas.

El volumen de residuos incorporados como fertilizantes a la agricultura y las posibles consecuencias que éstos pueden generar en el ámbito social y medioambiental hacen del todo necesario diseñar un modelo eficiente que de soporte a la toma de decisión espacial.

2.3. Fuentes

Una parte fundamental para el desarrollo del modelo es la cartografía base a partir de la cual se extraerán los mapas criterio. Se ha trabajado con datos procedentes de varias fuentes que han tenido que ser tratados y homogeneizados para poder incorporarlos en el SIG. El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) ha proporcionado el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir del cual se ha generado el mapa de pendientes. La cartografía referente a las variables climáticas (media anual de precipitación y temperatura), los cursos fluviales y las cubiertas vegetales se han extraído del Departament de Medi Ambient i Habitatge (DMAiH) de la Generalitat. De la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), empresa responsable de la administración hidráulica del territorio, se ha obtenido el mapa de vulnerabilidad de las masas de agua subterránea. El Institute for Environment & Sustainability (IES) que forma parte del Joint Research Centre de la European Commission cuenta con un centro de investigación dedicado al estudio del suelo, el European Soil Data Centre, el cual dispone de una base de datos cartográfica del suelo del que se ha incorporado el mapa de texturas en el estudio. Una de las variables esenciales para el modelo son los componentes del suelo, esta información se ha extraído de la tesis doctoral de Xavier Martínez Lladó¹. Con los datos proporcionados se han creado los criterios de carbonatos en suelo, el pH, el nivel de concentración

de metales y la materia orgánica. La [tabla 1](#) ofrece un resumen de la cartografía base y las distintas escalas de trabajo que se han tenido en cuenta para la elaboración del modelo, estas tienen una amplia variación debido a la diversidad de fuentes utilizadas.

3. Propuesta metodológica de un modelo de evaluación de los riesgos derivados de la incorporación de lodos de depuradora en el territorio.

3.1. Determinación de los criterios: factores y limitantes que configuran el impacto social y medioambiental

El desarrollo del modelo se basa en determinar la capacidad de acogida según el objetivo planteado. Es decir, "el grado de idoneidad que presenta el territorio para una actividad, teniendo en cuenta a la vez, la medida en que el medio cubre sus requisitos locacionales y los efectos de dicha actividad sobre el medio" (Gómez Orea, 1992, 25). Para determinar la idoneidad es necesario analizar el grado de aptitud que tiene el territorio para tolerar una actividad y el impacto que conlleva su introducción.

Para todo ello es fundamental definir el objetivo o problema, en nuestro caso ¿cual es la idoneidad de las áreas agrarias para la incorporación del lodos de depuración como fertilizante agrícola?, y establecer los criterios o variables territoriales que seleccionarán y clasificarán las alternativas. Es decir, los criterios que generarán las posibles áreas de solución al problema e intervendrán en la ponderación y evaluación final de las mismas. Estas variables o criterios se agrupan en dos categorías; los factores y los limitantes. Los primeros son los criterios o factores que realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración (Eastman *et al.*, 1993). Éstos, los factores, tienen que contener valores transformados en unidades comparables (Malczewski, 1999). Por otra parte, los limitantes son los que restringen la disponibilidad de las alternativas en función de la actividad evaluada, dando como resultado las soluciones potenciales en donde realizar la actividad (Gómez-Delgado y Barredo, 2005). Esta información será tratada en forma de base de datos cartográfica en la que cada factor y limitante se representará como una capa temática; la combinación de ellas junto con la ponderación e introducción de pesos y reglas de decisión, darán el resultado final: un mapa de las zonas agrícolas clasificadas según su idoneidad para la introducción de lodo de depuradora tratado.

Los factores y limitantes son determinados por referentes bibliográficos, por la legislación y por un equipo multidisciplinar de expertos entre los que se encuentran biólogos, ecólogos, geógrafos, ingenieros químicos, químicos, técnicos ambientales e informáticos. En el caso de estudio han de ser acordes con las bases que marca el Real Decreto 1310/1990 que regula la utilización de los lodos de depuración del sector agrario. Debido al carácter perjudicial que pueden tener estos materiales que condiciona su aplicación y, desde el punto de vista del modelo, es necesario tener en cuenta que los suelos sobre los que se aplicarán los lodos tendrán una concentración de metales pesados inferiores a los niveles límites establecidos ([tabla 2](#)). También delimitará los tipos de cultivo en los que será posible utilizar los lodos como fertilizantes.

Los **factores** son elegidos teniendo en cuenta variables de distintos ámbitos, que permitirán seleccionar las mejores alternativas en función de varios puntos de vista. Se pretende evaluar el impacto social y medioambiental teniendo en cuenta diferentes características medioambientales, sociales, demográficas, geomorfológicas, etc. para obtener como resultado unas alternativas que muestren el grado de idoneidad fruto de la combinación de estos factores. Así, este modelo se articula a partir de dos grandes criterios, el impacto social y el medioambiental. Cada uno de ellos, a su vez, se divide en subcriterios, población y territorio, en el primer caso, vulnerabilidad de las aguas subterráneas, contaminación del suelo y contaminación de las aguas superficiales en el segundo. Los subcriterios se obtienen a partir de la combinación de los factores normalizados.

Tal y como se ha explicado anteriormente, uno de los principales criterios del modelo es evaluar el impacto social que puede comportar la introducción de lodos de depuradora. Para ello se han analizado los siguientes factores combinados en subcriterios ([tabla 3](#)):

Densidad de población: evalúa la concentración de población residente en cada una de las áreas urbanizadas de modo que a mayor densidad de población, mayor riesgo de exposición a los efectos de los lodos.

Distancia a áreas urbanas: los malos olores que desprenden los lodos y la posibilidad de que las partículas en suspensión transportadas por el viento afecten a la población está en función de la distancia a las áreas urbanas. Este factor combinado con el criterio anterior determina el subcriterio de población.

Tipo de cultivo: permite distinguir el riesgo que supone para la población la incorporación de lodos en terrenos agrícolas según el cultivo que se encuentre en producción. Las especies agrícolas cuentan con una mayor o menor capacidad de absorción de contaminantes que pueden llegar a la población a través de su ingestión. Para evaluar este riesgo se han distinguido cuatro clases de cultivo (cereal, fruta, huerta y pastos) según su capacidad de transferencia de los contaminantes.

Precipitación: la precipitación media anual permite establecer el grado potencial de dispersión del contaminante en el territorio. A mayor precipitación se incrementa la probabilidad de que los contaminantes presentes en el lodo se infiltren en el suelo de modo que no sean absorbidos por las especies agrícolas.

Temperatura: la temperatura media anual se utiliza como criterio para determinar la degradación de los contaminantes ya que a mayor temperatura, mayor degradación y menor riesgo de que éstos pasen a los cultivos.

El segundo criterio es el de impacto medioambiental, a partir del cual se evalúa el impacto que pueda tener el lodo sobre el medioambiente. Para ello se ha determinado tres subcriterios que introducen distintos parámetros:

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Vulnerabilidad a aguas subterráneas: determinación de la vulnerabilidad de las masas de aguas subterráneas que deriva del cálculo cualitativo realizado por la ACA (2005) donde se tienen en cuenta características de la masa de agua, del suelo y de la topografía.

Otro subcriterio dentro del impacto medioambiental es reducir la contaminación del suelo con la pretensión de determinar las áreas con características idóneas para prevenir su posible contaminación. Para ello se consideran variables que afectan a la acumulación de contaminantes, hecho que está directamente relacionado con las características físicas y químicas del suelo (textura, pH, carbonatos, materia orgánica y contenido de metales), de elementos topográficos y climáticos.

- Textura: se ha ponderado según la clasificación que hace el European Soil Data Centre (European Communities, 2010) basado en el porcentaje de arena, limos y arcillas en el suelo, determinando que el riesgo de contaminación es mayor en un suelo con una textura arenosa que arcillosa.
- pH: este factor se encuentra en relación directa con la contaminación de metales en el suelo, siendo más disponibles cuando el suelo presenta un pH ácido. Como referente se han utilizado los valores normales de pH en suelos, dando puntuaciones superiores a los suelos básicos.
- Carbonatos: mide el porcentaje de CaCO_3 que contiene el suelo. Obtendrán valores altos los suelos con un porcentaje elevado de carbonatos ya que tienen la capacidad de movilizar el contaminante.
- Materia orgánica: factor relacionado con la estructura ya que los suelos bien estructurados disponen de contenidos altos de materia orgánica. Por lo tanto, se han determinado valores altos para aquellos suelos con un porcentaje elevado de materia orgánica.
- Contenido de metales: este criterio se ha evaluado de acuerdo con la normativa que marca el Real Decreto 1310/1990 en el Anexo I A ([tabla 2](#)), aplicando valores más elevados a los suelos con menor contenido de metales.
- Pendiente: la pendiente y los contaminantes procedentes del lodo están influenciados por la escorrentía superficial. Al aumentar el valor de la pendiente, disminuye la probabilidad de presencia de contaminantes en el suelo debido a una mayor escorrentía superficial. De esta manera, las celdas con mayores porcentajes de pendiente tendrán los valores más altos de normalización.
- Temperatura: la temperatura media anual permite valorar la degradación de contaminantes presentes en el suelo dado que éstos se degradan con mayor rapidez con temperaturas elevadas.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

- Precipitación: a mayores precipitaciones, menor riesgo de permanencia de los contaminantes aportados por los lodos en el suelo.

El último subcriterio trata de establecer el riesgo de contaminación de las aguas superficiales y para ello se ha examinado el transporte de contaminantes a la red hídrica a partir de factores como la distancia a la red hidrográfica y a las masas de agua superficiales, la temperatura, la precipitación y la pendiente del terreno.

- Distancia red hídrica: determinación de la distancia en metros entre los campos agrícolas y los cursos fluviales y masas de agua superficiales. Cuanto mayor sea esta distancia, la red hídrica tendrá menor riesgo de contaminación de modo que la normalización aplicará los valores de mayor idoneidad a las más lejanas.
- Pendiente: en este caso la pendiente, a diferencia de lo que sucede en el criterio de contaminantes del suelo, tiene una influencia inversa ya que a mayor pendiente, mayor probabilidad de que se produzca una escorrentía superficial y que llegue así el contaminante a la red hídrica.
- Temperatura: valoración establecida a partir de la temperatura media anual de manera que a mayores valores se producirá una mayor degradación de los contaminantes.
- Precipitación: se utiliza la misma variable que en el subcriterio de contaminación del suelo pero, en este caso, presenta una proporción inversa ya que cuanto menos precipitación se produzca, menor cantidad de contaminantes se incorporará a las aguas superficiales.

Los **limitantes** restringen las alternativas existentes en el área de estudio de manera que indican los espacios del territorio donde no se pueden introducir lodos de depuradora. Dado que obligatoriamente los lodos se han de aportar exclusivamente en zonas agrícolas, el resto de cubiertas del territorio funcionan como limitantes: áreas urbanas, red de carreteras, masas de agua superficial y red hídrica, vegetación natural y cualquier otra área en la que el uso del suelo no sea el agrícola. El último limitante es el que marca la normativa que regula la aplicación de lodos en suelo agrícola, y que solo permite la aplicación en cultivos de cereal, fruta, huerta y pastos, con una regulación y control exhaustivo en la aplicación del lodo para el último tipo mencionado.

3.2. Propuesta del modelo de evaluación multicriterio

Una vez definidos los criterios se ha elaborado un mapa para cada uno de ellos realizando una homogeneización de las capas que permitan su introducción en el SIG. El software utilizado ha sido Idrisi Andes v. 15. Este proceso se divide en dos partes, en primer lugar se aplican distintos tratamientos (interpolación de datos puntuales, redimensionamiento de la celda...) a las bases cartográficas para obtener un mismo formato y tamaño de modo que todos ellos se estructuren

mediante un modelo teselar con una resolución de 200 metros de celda y se refieran a la misma extensión geográfica lo que permita la superposición de capas². En segundo lugar, se han normalizado los valores de modo que todos los criterios se ajustan a una escala y unidad de medida que permite compararlos entre sí. Para ello se ha aplicado un ajuste lineal que reescala los criterios en un rango de 0 a 1 según los valores de utilidad, entendidos como un valor **a** que será al valor real a partir del cual le corresponderá el valor 0 (límite de indiferencia) y otro máximo al que se le aplicará el valor 1, denominado valor **b** (límite de estricta preferencia), los cuales son determinados previamente (valores de corte). Además, los valores comprendidos entre este máximo y mínimo se ponderarán entre los normalizados de 0 y 1 y aquellos registros que en la realidad presenten cifras superiores al valor de utilidad mayor siempre será ajustado a 1. De este modo se considera que, cuanto más cercanos a 0 sean los valores, menos óptima es la adecuación del factor mientras que, cuando se encuentren más próximos a 1, se entenderá que en este punto el criterio tiene un valor de adecuación inmejorable. Este funcionamiento se ha aplicado a factores de tipo cuantitativo utilizando la función lineal de incremento monótono o la de decrecimiento monótono dependiendo del caso ([figura 1](#)). En la [tabla 4](#) se recogen los valores de utilidad y el tipo de función lineal aplicados a los diferentes criterios, que derivan de diversa bibliografía, legislación y que ha sido consensuadas por el equipo multidisciplinar de expertos. Un ejemplo de incremento monótono ([figura 1a](#)) corresponde a la temperatura donde el intervalo de 0 a 5 °C tendrá valor de adecuación 0, en el de 5 a 17 °C los valores se reescalarán entre el rango de 0 a 1 y a partir de 17 °C y superiores les corresponderá el valor 1. En cambio, para la densidad de población la función utilizada es de decrecimiento monótono ([figura 1b](#)), obteniendo un re-escalamiento inverso de los valores. En este caso las cifras elevadas del factor tendrán un valor de adecuación de 0, mientras que cuanto más bajo sea el valor original, su adecuación será mayor. De este modo, a una densidad superior a 100 habitantes/km² le corresponde un valor de normalización 0, mientras que para densidades inferiores a 30 habitantes/km² la adecuación será 1. Los valores intermedios se ponderarán entre estas dos cifras. Para los factores con escalas cualitativas, como el tipo de cultivo, textura del suelo o la vulnerabilidad del agua subterránea, los expertos han determinado el valor normalizado para cada una de las categorías presentes siempre ciñéndose al rango 0-1 ([tabla 5](#), [tabla 6](#) y [tabla 7](#)). Otro de los elementos que es necesario introducir en el modelo son los criterios limitantes que han sido tratados como capas booleanas. Es importante realizar bien la fase de normalización ya que el ajuste preciso de relación facilitará una correcta valoración (Vía García *et al.*, 2007) y además serán la base cartográfica que conforma los datos de entrada sobre los que se ha construido el modelo.

El desarrollo del modelo se ha basado en la jerarquización ponderada de los factores que ha consistido en la superposición de capas (factores) a partir de diferentes niveles de agregación y de la aplicación de pesos. Se ha seguido un orden predeterminado para obtener como resultado final el mapa de adecuación a la incorporación de lodos. El proceso de superposición es sucesivo y así, a partir de los criterios, se obtienen los subobjetivos y derivados de éstos los objetivos. De la agregación de los objetivos impacto social e impacto medioambiental resulta el mapa de idoneidad ([figura 2](#)).

En el proceso de diseño de este modelo se ha utilizado la técnica EMC ya que permite aplicar reglas de decisión haciendo posible la introducción de condiciones y prioridades entre criterios. La técnica utilizada ha sido la LSP (Logic Scoring of Preferences) creada por Dujmović (2007). Ésta se basa en un modelo matemático que calcula el grado de idoneidad (E) de cada celda

de la zona de estudio. El procedimiento consiste en aplicar una función lógica para todos los criterios que intervienen obteniendo un resultado clasificado y normalizado. Tal y como se ha mencionado anteriormente, la normalización del resultado final se centra en un rango de 0 a 1, donde el valor 0 implica el mínimo grado de idoneidad de las alternativas y el 1 designa las opciones más capacitadas para realizar la actividad. Es un modelo basado en el álgebra de mapas que utiliza un conjunto de formulas y funciones algebraicas manipulando los datos geográficos y combinando varias capas cartográficas (Dujmović, De Tré y Van de Weghe, 2008).

$$E(r) = (W_1 E_1^r + W_2 E_2^r + \dots + W_k E_k^r)^{1/r} \quad [1]$$

La ecuación 1 es la función aplicada para la agregación de los factores. Su objetivo es resaltar la prioridad e importancia de cada factor mediante las reglas de decisión generadas por el agregador (r), y por los pesos (W) que asignan los expertos a cada uno de los criterios involucrados. Los pesos definen el porcentaje de importancia de cada uno de los criterios que participan en la relación (por ejemplo 60% criterio a y 40% criterio b), mientras que los agregadores indican la relación de conjunción o disyunción existente entre dos criterios y que es tenida en cuenta a la hora de asociarlos. Estos agregadores son seleccionados según la relación de importancia que tengan los criterios. Dujmović establece los operadores de Conjunción / Disyunción Generalizados (Generalized Conjunction / Disjunction, GCD) según la relación de simultaneidad o reemplazo entre criterios (Dujmović, 2007). Una relación de simultaneidad existe cuando los criterios tienen una importancia elevada por igual. La intensidad de simultaneidad se establece según su mayor "andness" o grado de conjunción. La relación de reemplazo se da cuando un criterio tiene un valor satisfactorio y éste compensa a los otros que cuentan con valores menos adecuados. En este caso la intensidad "orness" o grado de disyunción es la que determina la relación entre ambos (Dujmović, 2007). Esto significa que cuando dos criterios se asocian de modo conjuntivo ambos han de contar con valores altos para que el dato de la idoneidad resultante sea elevada, mientras que si la relación es disyuntiva, el valor bajo de uno de los dos criterios puede ser compensado con el valor alto del otro resultando una idoneidad aceptable. A cada tipo de conjunción / disyunción le corresponde un valor determinado para el Exponente (r) que será el utilizado a la hora de aplicar la ecuación.

Para el desarrollo del modelo se han seleccionado cuatro agregadores de conjunción y disyunción en función del comportamiento de los criterios a la hora de combinarlos lo que permitirá introducir las reglas de relación en el sistema (tabla 8). La figura 2 muestra el diseño conceptual del modelo de evaluación multicriterio generado que se ha implementado aplicando la formula matemática a cada uno de los niveles según el agregador y peso definidos.

Para cada nivel de agregación se han obtenido mapas intermedios que presentan valores ponderados de 0 a 1, fruto de la combinación de dos o más criterios. En este proceso de evaluación se han generado resultados parciales hasta llegar al penúltimo nivel en el que se ha cumplido con el objetivo específico al mostrar mediante dos mapas el impacto social e impacto medioambiental potenciales de la actividad: la incorporación de lodos tratados en el conjunto del área de estudio.

3.3. Implementación del modelo en el Sistema de Información Geográfica

Implementar el modelo multicriterio en el SIG ha consistido en aplicar la fórmula básica LSP (ecuación 1) en cada una de las agregaciones definidas en el modelo ([figura 2](#)). Este proceso se inicia insertando los criterios en el primer nivel jerárquico (criterios de fondo gris en el modelo conceptual) y se repite en cada punto de agregación generando una serie de mapas intermedios ponderados (de 0 a 1).

La [figura 3a](#) muestra un ejemplo de agregación en el primer nivel. Éste consiste en la incorporación de tres criterios (tipo de cultivo, temperatura y precipitación) que se combinan con un agregador de disyunción débil (DA), para obtener el mapa intermedio de "Territorio". Se le ha asignado este tipo de agregador porque se complementan entre ellos: si hay mucha intensidad de lluvia pero las temperaturas son bajas, los materiales del lodo se escurrirán más fácilmente del cultivo, y si no hay lluvia pero las temperaturas son altas, estos se evaporarán antes. Siempre que alguno de los factores tenga un valor alto, el resultado será aceptable. Además de determinar el tipo de agregador de criterios, a cada uno de ellos se le asigna un peso determinado en función de su importancia a la hora de configurar el mapa resultante. En este caso el tipo de cultivo participa en un 60%, la temperatura en un 20% y la precipitación en otro 20% lo que da el total del 100%. La ecuación resultante ([figura 3b](#)) se utiliza para combinar las tres capas cartográficas normalizadas mediante el módulo Image Calculator de Idrisi, herramienta que permite realizar álgebra de mapas, aplicando expresiones matemáticas y operaciones lógicas.

El resultado es el mapa ponderado "territorio" que indica la idoneidad derivada de la combinación del criterio de tipo de cultivo, temperatura y precipitación ([figura 4](#)). En la configuración de esta capa es evidente que predomina el criterio de cultivo, debido a los valores de idoneidad alta que presenta el mapa de entrada. El conjunto de Cataluña cuenta con valores entre, aproximadamente, 0.5 y 1. La llanura de Lérida presenta un comportamiento ambivalente concentrando tanto los niveles de aptitud más bajos (0.5), como consecuencia del régimen anual de precipitaciones y de temperaturas que presenta capacidad baja para la actividad planteada, como elevados (entre 0.8 y 0.9) derivados del alto valor que tiene el criterio de cultivos.

La [figura 5](#) muestra la agregación conjuntiva de los factores de pendiente e hidrología para obtener el relieve. En este caso la relación es de simultaneidad. Ambos factores tienen que ser altos para obtener un resultado aceptable en el mapa de relieve. Se tienen que cumplir los dos criterios, cuanto más baja sea la pendiente y más lejos esté de un curso fluvial, los resultados serán más próximos a 1. Los pesos aplicados son de 30% para la pendiente y 70% para la hidrología, ya que prima la distancia al curso fluvial frente a la pendiente.

Los diferentes criterios, en forma de capas cartográficas, se van combinando en función de los pesos y agregadores incluidos en el modelo. En el penúltimo nivel se generan los mapas semifinales que cumplen los objetivos específicos: mapa de impacto social y mapa de impacto medioambiental. La combinación de estas dos capas en el último nivel de la jerarquía generará el resultado final del modelo: el mapa de idoneidad para la aplicación de lodos de depuradora.

4. Resultados

La aplicación secuencial del modelo hace que en un primer momento se obtengan unos resultados parciales para, a partir de su relación, llegar al mapa final. El mapa de **impacto social** surge de la combinación de los mapas intermedios de territorio y de población, que se han agregado mediante un operador de disyunción débil (DA). La [figura 6](#) refleja que el mayor riesgo social se concentra en los núcleos de población y zonas inmediatas que, según la ponderación, están calificadas con un nivel de idoneidad baja (de entre 0.25 hasta 0.55, tonos rojos a amarillos). Los valores inferiores corresponden a los municipios agrícolas de la llanura de Lérida debido a la proximidad de sus núcleos urbanos a los campos de cultivo. En cambio, en el área metropolitana de Barcelona el riesgo disminuye debido a que las zonas agrarias se encuentran muy distantes a la ciudad, tal y como queda patente en el mapa final catalogada esta zona como limitante.

El **impacto medioambiental** ([figura 7](#)) es el resultado de la agregación de los mapas intermedios que evalúan la contaminación en el suelo, la contaminación sobre el agua superficial y la contaminación del agua subterránea. El operador utilizado ha sido el de conjunción débil (CA) que une los factores basándose en que los tres presentan el mismo grado de importancia y que no se pueden compensar entre sí de modo que es necesario que todos cuenten con valores altos para obtener una idoneidad elevada. Este operador es más restrictivo que el anterior dando como resultado, en general, valores inferiores para todo el conjunto del territorio. La zona de los Pirineos aparece con valores de idoneidad 0 (color negro), es decir que el impacto que provocaría la aplicación de lodos sería el máximo posible debido a la fuerte pendiente, a un suelo bastante desestructurado y a la presencia de metales pesados provenientes de las actividades ganaderas tradicionales. Las zonas de color naranja corresponden a valores entre 0.25 y 0.38 reflejando el impacto potencial sobre las aguas subterráneas debido a su fragilidad. Las áreas aledañas a los cursos fluviales quedan englobadas en esta categoría observándose este hecho de forma muy clara en el caso del río Ebro.

El resultado final, el **mapa de idoneidad** ([figura 8](#)), se presenta como un mapa reclasificado en 4 categorías en función de su adecuación para la aplicación de lodos de depuradora. Previamente a este tratamiento se ha calificado el área no apta debido a la presencia de limitantes para aplicar lodos (e.g. superficie urbana, áreas de vegetación natural, etc.) como "territorio no apto". Una vez despreciada esta superficie, se ha clasificado el área de estudio en alternativas no aptas, idóneo bajo, idóneo moderado e idóneo alto, siguiendo el nivel mínimo aceptable establecido por Dujmović (2007), donde expone que estos valores tendrían que estar comprendidos entre 0.67 y 0.75. Entonces las primeras, las alternativas no aptas, corresponden a aquellos espacios que no llegan a los valores mínimos de idoneidad; los comprendidos entre 0 y 0.67 y entre ellos destaca el Delta del Ebro. El conjunto de las alternativas aceptadas se distribuyen principalmente en la depresión central de Cataluña y en el valle del Ebro. La idoneidad baja comprende valores de 0.67 a 0.75 y afecta mayoritariamente a las zonas agrícolas adyacentes a cursos fluviales. La idoneidad media (valores de 0.75 a 0.80) se concentra en el sur de Cataluña, en el valle del Ebro y en la depresión central. Estas zonas cuentan con la característica de que sus acuíferos son algo vulnerables pero, en cambio, el tipo de cultivo es el cereal, el de mayor aptitud para aplicar lodos. La idoneidad alta (0.8 hasta 1) es la combinación de tipos de cultivo de cereales o frutales situados en áreas poco vulnerables para el agua superficial y subterránea y con unas buenas condiciones

estructurales, físicas y químicas del suelo que también se encuentran en su mayoría en el valle del río Ebro.

5. Conclusiones

Como resultado de este trabajo se ha obtenido un modelo de EMC orientado a ayudar en la decisión espacial que valora la idoneidad del territorio para recibir lodos tratados de depuradora teniendo en cuenta el potencial impacto social y medioambiental. Para el diseño y ejecución del modelo se han utilizado Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), herramientas que se han mostrado eficientes en el desarrollo del mismo. La incorporación de ambas prácticas en una única metodología tiene como principal fortaleza que ésta aún la capacidad de los SIG para almacenar, tratar y representar datos georeferenciados con las cualidades de la EMC en el diseño de modelos para la resolución de problemas de decisión.

Uno de los aspectos limitantes que presenta esta propuesta es la diversidad de escalas con las que se ha trabajado y las diferentes resoluciones de los píxeles, dando unos resultados que conforman una aproximación general. Con la intención de mejorarlo y, a la vez, valorar su eficacia y fiabilidad se pretende realizar una aproximación de detalle a partir de escalas mayores, utilizando como área de estudio un municipio o comarca con características similares al conjunto del territorio lo que permite una verificación de campo y, en consecuencia, una comprobación espacial del modelo.

También cabe destacar la efectividad del método LSP (Logic Scoring of Preferentes, Puntuación Lógica de Preferencias) puesto que permite incorporar al modelo EMC un número amplio de criterios (18 en el presente caso), al contrario que otros, con serias limitaciones en relación a la cantidad de criterios contemplados. Otra ventaja es que la importancia de un factor no recae únicamente en el peso que este tiene, sino que las reglas de decisión en este sentido juegan un papel significativo. A la vez, no se conoce hasta qué punto éstas son determinantes en los resultados finales por lo que, como trabajo futuro, se pretende aplicar un análisis de sensibilidad con la intención de evaluar la robustez del modelo y conocer la importancia de cada criterio en la configuración del mapa final de idoneidad. Este proceso permitirá depurar y mejorar el modelo ajustando los pesos de algunos criterios o reconsiderando los operadores de agregación disyuntivos y conjuntivos. En los resultados preliminares del análisis de sensibilidad se ha observado que los criterios repetidos bajan su peso en el resultado final, y el factor de densidad de población tiene una importancia mínima ya que es totalmente reemplazable por el criterio de distancia a áreas urbanas, cosa que hace replantearse la posibilidad de modificar la estructura del modelo y hasta llegar a eliminar los factores menos decisivos. Por otra parte, que el método no presente restricciones al número de criterios introducidos, hace que se incorpore un número elevado de ellos lo que deriva en un modelo de alta complejidad, con necesidad de generar bases de datos cartográficas que en muchos casos no se encuentran disponibles. El desarrollo del análisis de sensibilidad presumiblemente permitirá reducir la complejidad del modelo, incorporando únicamente aquellos criterios que verdaderamente sean significativos con lo cual éste podría ser aplicado con mayor facilidad.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Finalmente y para completar el modelo será necesario calcular un indicador integrado de idoneidad y viabilidad económica que combine la idoneidad del territorio con el coste económico de aplicar el lodo derivado de su tratamiento y transporte hasta el destino final. Este nuevo indicador permitirá ponderar las alternativas en función de criterios económicos, sociales y medioambientales.

Agradecimientos

Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del proyecto titulado "Desarrollo de un modelo de evaluación de exposición y riesgo por la aplicación de lodos de depuradoras en suelo agrícola, basado en un Sistema experto integrado en Sistemas de Información Geográfica", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, CTM2007-64490, y el proyecto SOSTAQUA, fundado por el CDTI en el marco del Programa Ingenio 2010 de la convocatoria CENIT.

Referencias bibliográficas

- Agència Catalana de l'Aigua (2005): *Caracterització de masses d'aigua*. Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya.
<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?nfpb=true&pageLabel=PI206154461208200586461>
- Agència Catalana de l'Aigua (2008): *Resum de dades de producció i gestió de fangs*. Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya.
<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?nfpb=true&pageLabel=PI224854461208201510244>
- Agència Catalana de l'Aigua (2009): *Consulta IMPRESS*. Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya.
<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?nfpb=true&pageLabel=PI223054461208201423967>
- Anagnostopoulos, K. P., Vavatsikos, A. P., Spiropoulos, N. y Kraias, I. (2009): "Land Suitability analysis for natural wastewater treatment systems using a new GIS add-in for supporting criterion weight elicitation methods", *Operational Research*, 10, 1, pp. 91-108.
- Barredo, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ra-Ma.
- Clark Labs. (2001): IDRISI Andes Version 15.00. Clark University, Worcester, MA. USA.
- Departament de Medi Ambient i Habitatge (DMAiH) (2009): *Cartografia. Bases disponibles*. Departament de Medi Ambient i Habitatge.
http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/cartografia/
- Dujmović, J. J. (2007): "Continuous Preference Logic for System Evaluation", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15, 6, pp. 1082-1099.
- Dujmović, J. J. y Larsen, H.L. (2007): "Generalized conjunction/disjunction", *International Journal of Approximate Reasoning*, 46, pp. 423-446.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Dujmović, J. J., De Tré, G. y Van de Weghe, N. (2008): "Suitability maps based on the LSP method", en Proc. of the 5th MDAI conference (Ed): *Modelling decisions for artificial intelligence*. Berlin / Heidelberg, Springer, pp. 15-25.

Eastman, J. R., Kyem, P. A., Toledano, J. y Jin, W. (1993): *GIS and decision making*. Ginebra, United Nations Institute for Training and Research (UNITAR).

Gómez-Delgado, M. y Barredo, J. I. (2005): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Paracuellos de Jarama, Ra-Ma.

Gómez, D. (1992): *Evaluación de impacto ambiental*. Madrid, Editorial Agrícola Española.

Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) (2009): *Descàrrega de productes digitals*. Institut Cartogràfic de Catalunya.

<http://www.icc.es/cat/Home-ICC/Inici/Cartografia/Productes/Descarrega>

Institut d'Estadística de Catalunya Idescat (2009):<http://www.idescat.cat/>

European Communities, 1995-2010. European Soil Data Centre del Land Management & Natural Hazards Units: *Soil Datasets*. European Commission - Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/>

Lamelas, M. T. (2009): "Esquema metodològic para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus*, 9, pp. 28-66.

Malczewski, J. (1999): *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York, John Wiley & Sons, Inc.

Martinez, X. (2008): *Presència, mobilitat i risc d'elements traça en sòls naturals: Els mecanismes de sorció com a reguladors de l'equilibri sòl-aigua*. Tesis doctoral no publicada, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE número 262 de 1.11.1990, p. 32339 - 32340.

NCGIA (1990): *National Center for Geographic Information and Analysis*. Goodchild, M. y Kemp, K. Volume 1. Santa Barbara, University of California.

Sumathi, V. R., Natesan, U. y Sarkar, C. (2007): "GIS-based approach for optimised siting of municipal solid waste landfill", *Waste Management*, 28, pp. 2146-2160.

Valls, A., Schuhmacher, M., Pijuan, J., Passuello, A. y Nadal, M. (2009): "Some approaches to the use of MCDA tools for the management of sewage sludge application on agricultural soils", *Workshop: 69th Meeting of the European Working Group "Multiple Criteria Decision Aiding"*. Brussels, Université Libre de Bruxelles.

Vía, M., Muñoz, M. C. y Martín, B. (2007): "Propuesta metodològica para la detección de áreas singulares de vegetación y flora en las áreas no protegidas de la Comunidad de Madrid", *GeoFocus*, 7, pp. 37-55.

Voogd, H. (1983): *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. London, Pion.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Cartografía base.

Criterio	Fuente	Escala / Resolución del píxel
MDE	ICC	200 m
Precipitación	DMAiH	1:750.000
Temperatura	DMAiH	1:750.000
Hidrología	DMAiH	1: 50.000
Tipos de cultivos	DMAiH	1: 50.000
Vulnerabilidad aguas subterráneas	ACA	1:250.000
Textura	European Soil Database. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability.	1 km
Carbonatos	Martinez Llado, X; 2008	2.7 km
Metales	Martinez Llado, X; 2008	2.7 km
pH	Martinez Llado, X; 2008	2.7 km
Materia orgánica	Martinez Llado, X; 2008	2.7 km

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Concentración máxima de metales pesados según pH del suelo (medido en mg/kg de materia seca).

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	1	3
Cromo	100	150
Cobre	50	210
Mercurio	1	1,5
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450

Fuente: Anexo I A del R/D 1390/1990.

Tabla 3. Jerarquía de los factores.

Criterios	Subcriterios	Factores
Impacto Social	Población	Densidad de población
		Distancia áreas urbanas
	Territorio	Tipo cultivo
		Precipitación
		Temperatura
Impacto Medioambiental	Vulnerabilidad aguas subterráneas	Vulnerabilidad acuíferos
	Contaminación del suelo	Textura
		PH
		Carbonatos
		Materia orgánica
		Metales
		Pendientes
		Temperatura
		Precipitación
	Contaminación de las aguas superficiales	Distancia red hídrica
		Pendientes
		Temperatura
		Precipitación

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. Valores de corte para la normalización de los factores cuantitativos.

Factores	Unidades de medida	Valores de utilidad		Función lineal (figura 1)
		a	b	
Densidad de población	hab/km ²	100	30	Decrecimiento monótono
Distancia áreas urbanas	m	0	14000	Incremento monótono
Temperatura	°C	5	17	Incremento monótono
Precipitación	mm	100	600	Incremento monótono
Materia orgánica	%	1	6	Incremento monótono
pH	pH	5	8	Incremento monótono
Carbonatos	% CaCO ₃	5	20	Incremento monótono
Temperatura	°C	5	17	Incremento monótono
Precipitación	mm	100	600	Incremento monótono
Pendiente	%	8	15	Incremento monótono
Temperatura	°C	5	17	Incremento monótono
Precipitación	mm	600	100	Decrecimiento monótono
Pendiente	%	15	8	Decrecimiento monótono
Distancia red hídrica	m	0	500	Incremento monótono

Tabla 5. Normalización del tipo de cultivo.

Normalización	Nivel aceptación
0.98	Cereal
0.88	Frutal
0.59	Huerta
0.29	Pastos
0	Sin cultivo

Tabla 6. Normalización de la textura.

Normalización	Nivel aceptación
1	Muy fina
0.78	Fina
0.59	Medio fina
0.39	Media
0.2	Tosco

Tabla 7. Normalización de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

Normalización	Nivel aceptación
1	Sin acuífero
0.9	Bajo
0.6	Moderado
0.2	Alto

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

Tabla 8. Agregadores GCD utilizados en la aplicación del LSP.

Operadores	Símbolo	Orness (d)	Andness (c)	Exponente (r)
Disyunción fuerte	D++	0.9375	0.0625	20.630
Disyunción débil	DA	0.7500	0.2500	3.929
Neutralidad	A	0.5000	0.5000	1.000
Conjunción débil	CA	0.2500	0.7500	-0.720

FIGURAS

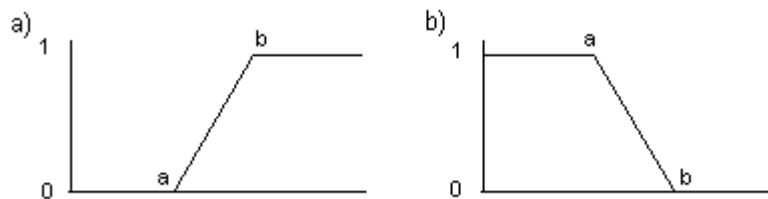


Figura 1. Funciones lineales, a) función de incremento monótono, b) función de decrecimiento monótono.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

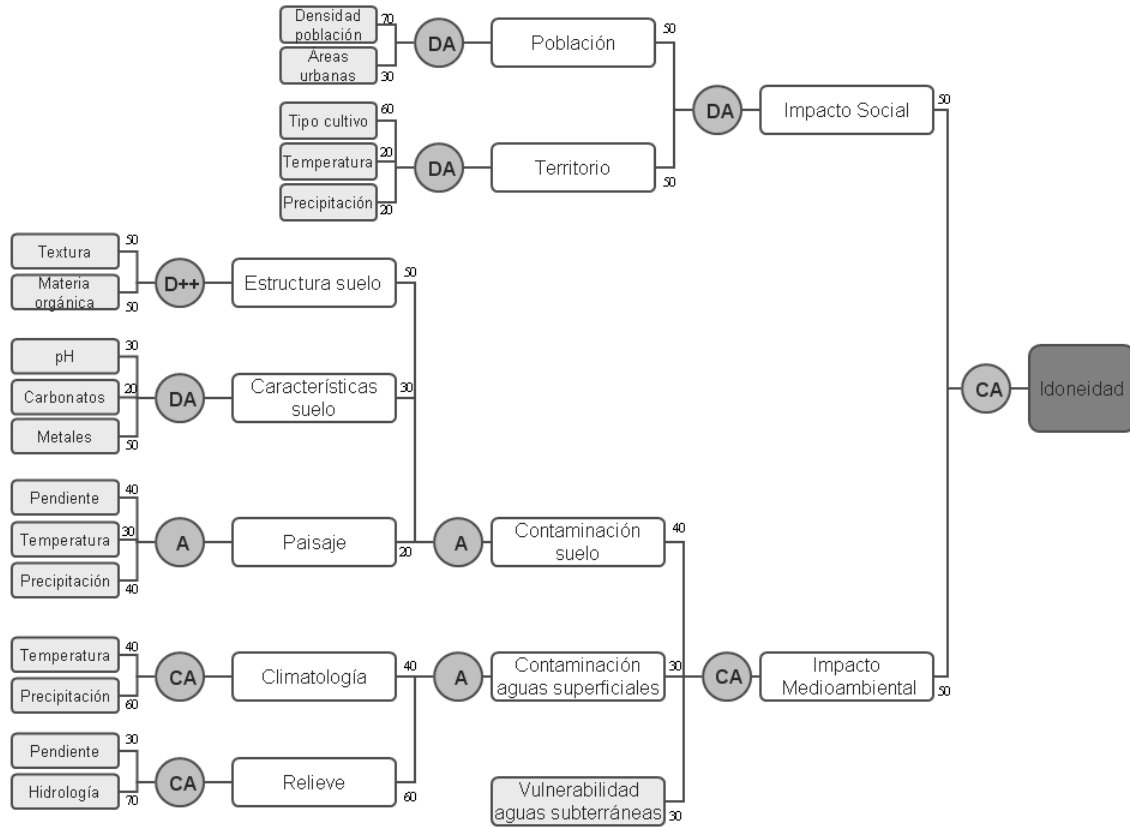


Figura 2. Modelo de agregación.

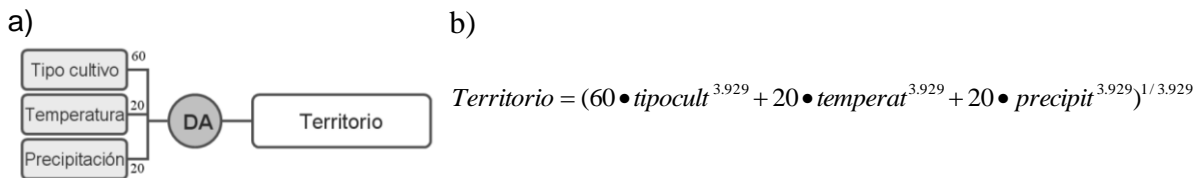


Figura 3. a) Ejemplo conceptual de agregación y b) de aplicación de la ecuación.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

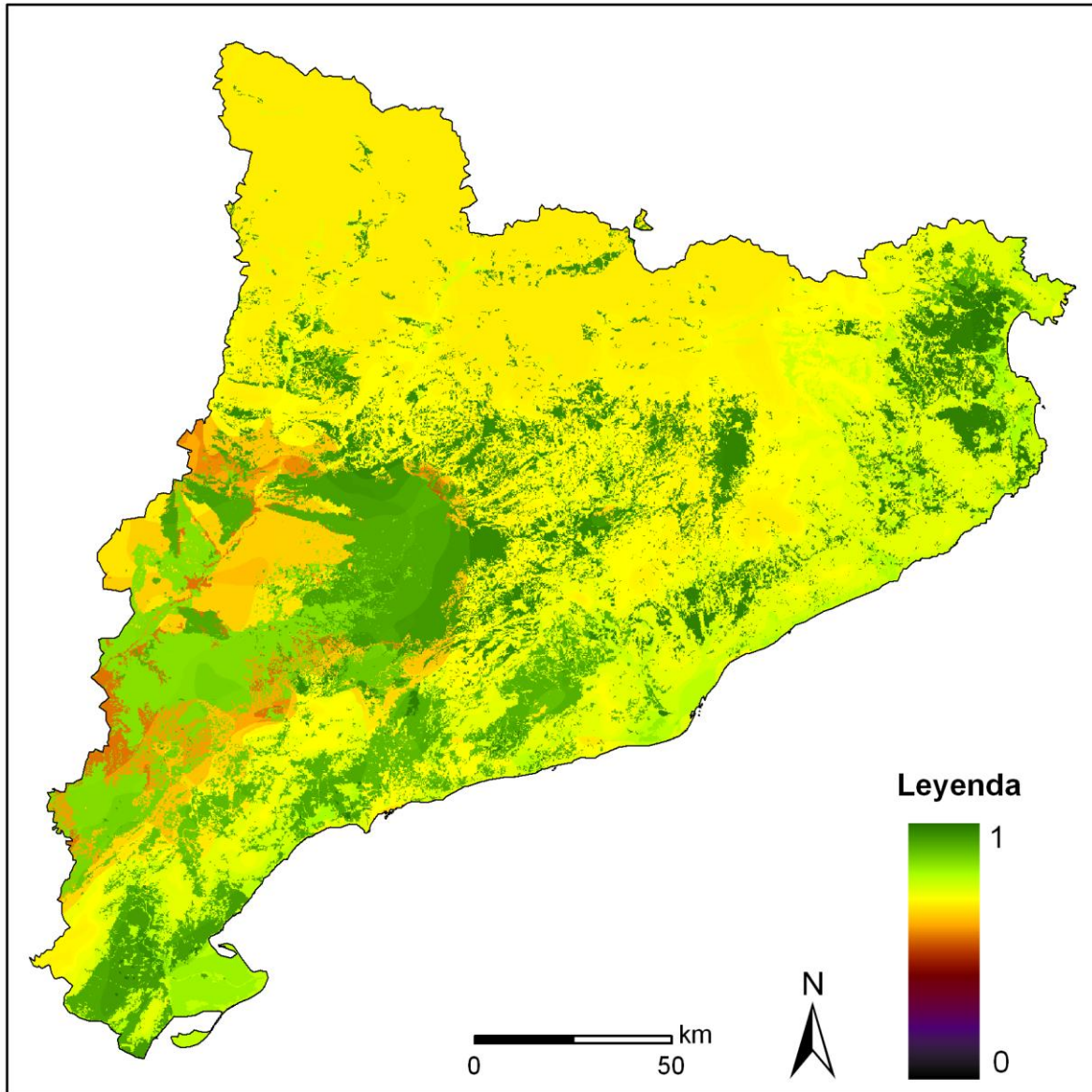


Figura 4. Territorio (capa cartográfica intermedia).

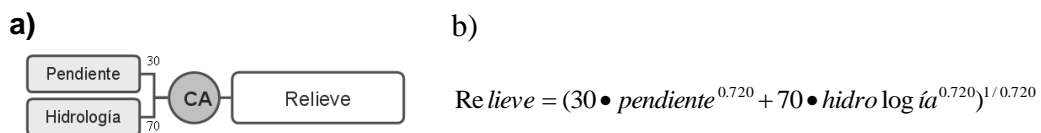


Figura 5. Ejemplo conceptual de a) agregación y b) de aplicación de la ecuación.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

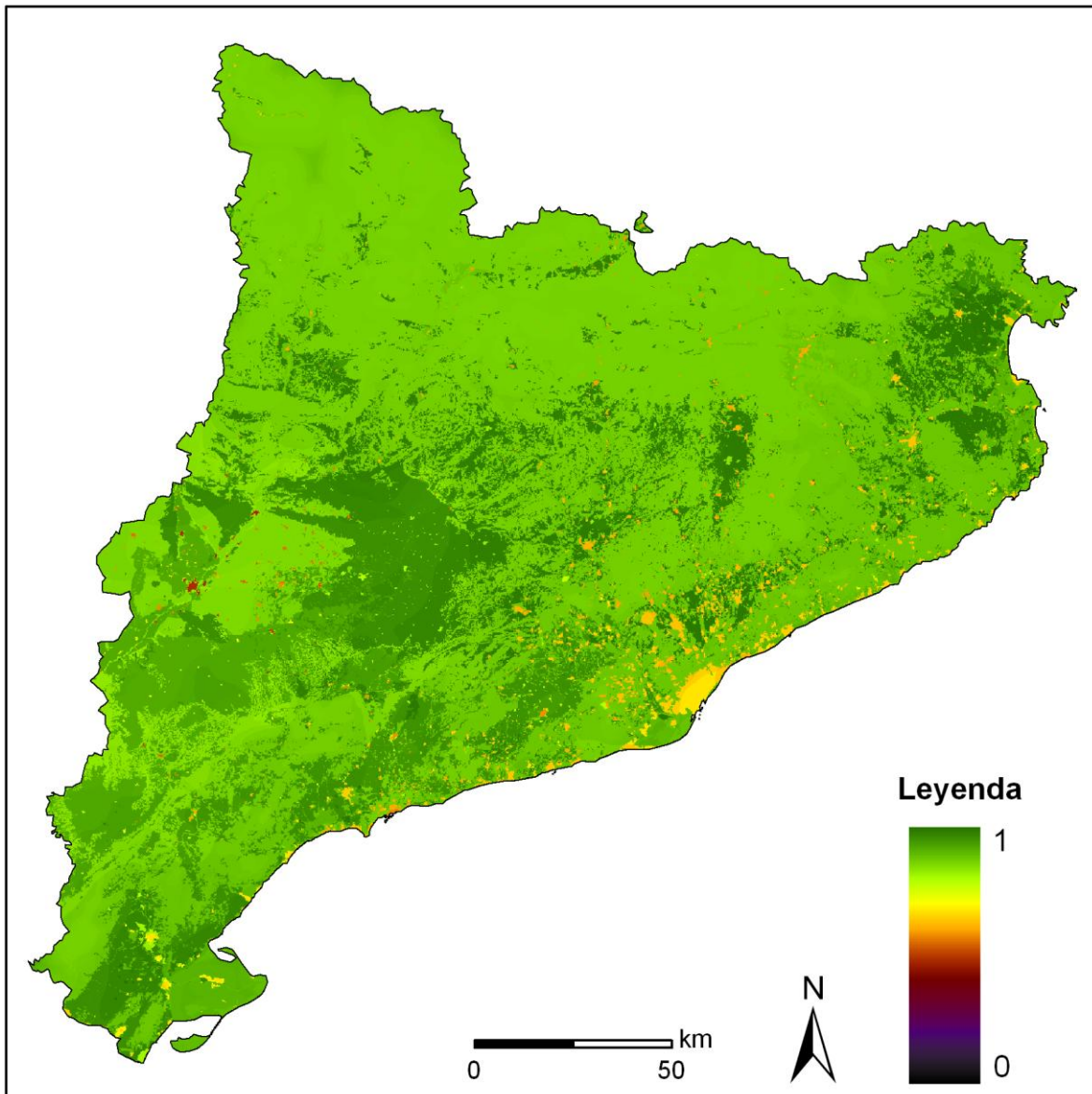


Figura 6. Impacto social.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

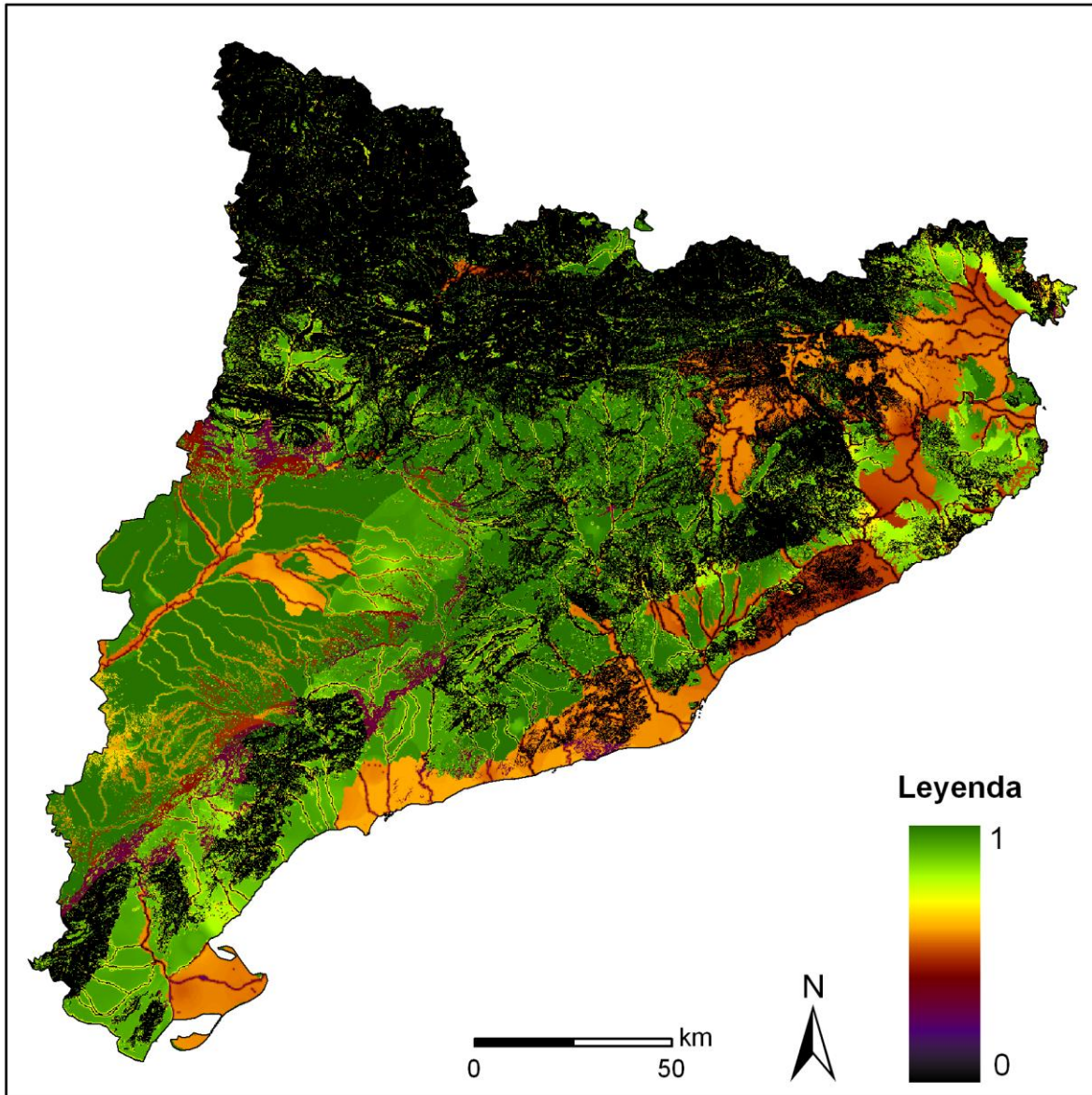


Figura 7. Impacto sobre el medio ambiente.

Pérez Albert, Y., Cadiach Ricoma, O., Passuello, A. y Schuhmacher, M. (2010): "Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p.208-231. ISSN: 1578-5157

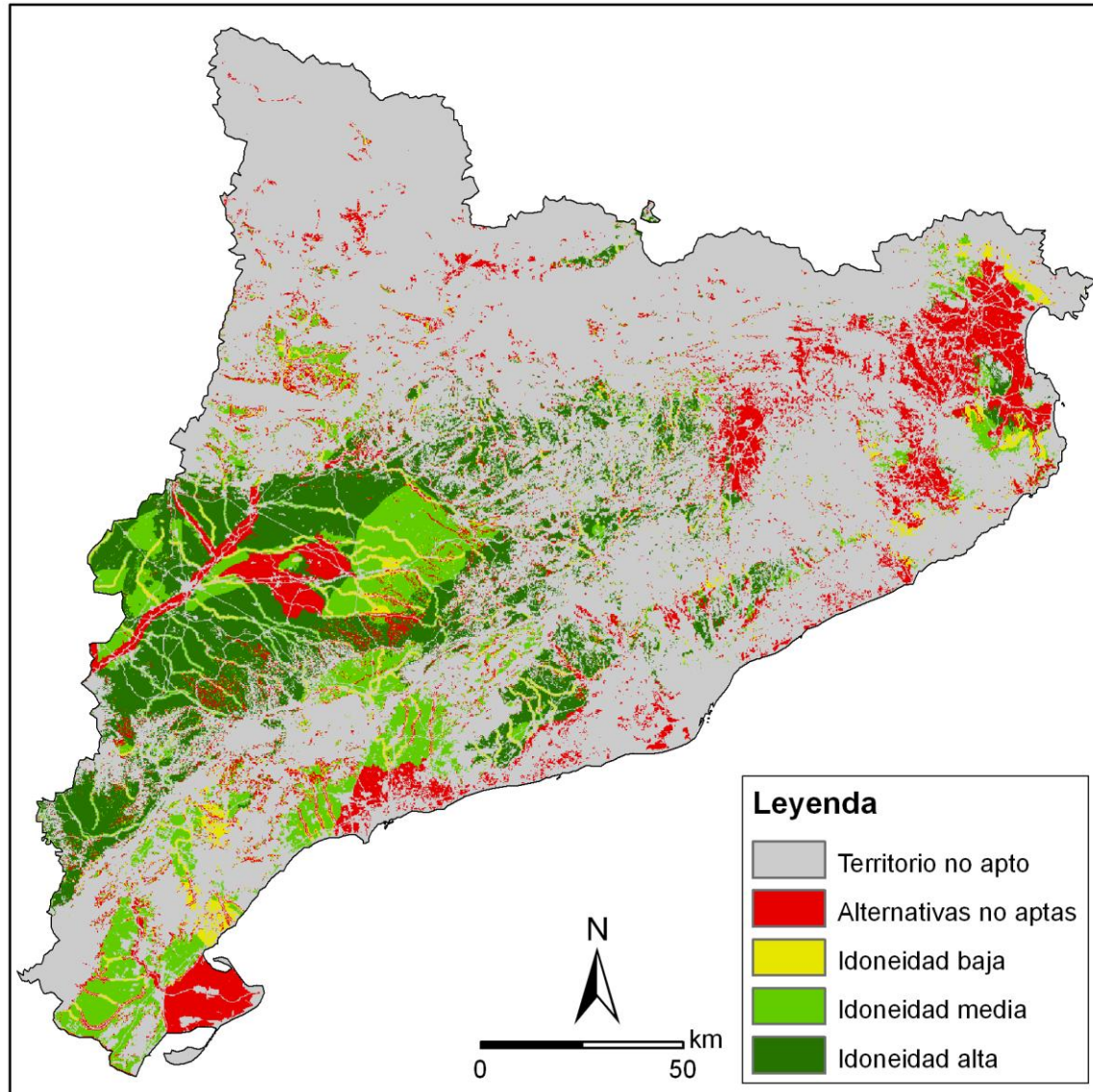


Figura 8. Reclasificación del mapa de idoneidad.

¹ Martínez Lladó, Xavier (2008): *Presència, mobilitat i risc d'elements traça en sòls naturals: Els mecanismes de sorció com a reguladors de l'equilibri sòl-aigua*. Tesis doctoral no publicada, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

² Por norma, y con la intención de salvaguardar la precisión de los datos, la homogenización del tamaño de las celdas se realiza adaptando las bases de datos a aquella de mayor tamaño. En este caso, al tratarse de una prueba piloto en la que la finalidad es aplicar una nueva metodología, se ha optado por redimensionarlas sin tener en cuenta esta regla.