

TÍTULO: Aplicación de la decisión multicriterio en la ordenación de masas adhesionadas

AUTORES: Marín Pageo, F.J.; Domingo Santos, J.M. y Fernández de Villarán San Juan, R.
Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Politécnica Superior La Rábida, Universidad de Huelva, 21819 Palos de la Frontera (Huelva)
e-mail del primer autor (Francisco Marín): juan@uhu.es

Resumen

La ordenación de dehesas y montes huecos mediterráneos encuentra, entre otros problemas, con la difícil tarea de lograr una regeneración efectiva con los menores costes económicos posibles. A la hora de elegir los cantones, rodales o bosquetes que van a regenerarse la densidad, la salud y la edad del arbolado son los factores que se consideran de mayor peso en la toma de decisiones; sin embargo, existen otras variables que pueden tener importancia como pueden ser las pendientes, la productividad pascícola o la vecindad de otras superficies en regeneración. En este trabajo se presenta una metodología de incorporación del análisis multicriterio combinado con un sistema de información geográfica para la elección de zonas de regeneración preferente dentro de una masa mixta de encina y alcornoque en la Sierra Norte de Sevilla. La técnica resulta útil para la priorización de la regeneración, ya que los problemas de la masa son variados y también lo es su localización. Con mayores o menores restricciones las ayudas a la decisión mediante estas técnicas se muestran viables para la definición de superficies de regeneración en ordenaciones mediante tramo único, tramo móvil y entresaca por bosquetes.

PALABRAS CLAVE: decisión multicriterio, ordenación, sistemas de información geográfica, dehesas, regeneración.

INTRODUCCIÓN

La planificación territorial consiste principalmente en el análisis del territorio y la toma de decisiones sobre la distribución espacial de los distintos usos del suelo. En esta asignación de usos debe existir un equilibrio entre desarrollo y conservación, entre vías de comunicación y núcleos urbanos, entre calidad ambiental e industrialización, entre zonas agrícolas y zonas forestales, etc. La búsqueda de este reparto óptimo de funciones territoriales es una tarea compleja en la que resulta fundamental manejar una información sobre el territorio al mayor nivel de detalle posible, así como el establecimiento de una serie de criterios y de prioridades de asignación de usos.

De forma análoga a la ordenación del territorio, en la planificación forestal la toma de decisiones hace tiempo que ha dejado de obedecer a criterios únicos, dado el carácter multiobjetivo de los montes, en especial en el ámbito mediterráneo.

Las técnicas de decisión multicriterio son herramientas matemáticas que permiten la obtención de soluciones óptimas según un conjunto de criterios de elección. Hablamos de soluciones óptimas, en plural, porque éstas pueden variar según el tipo de criterios aplicados y según la importancia o peso asignado a cada criterio. Además, para un mismo conjunto de criterios y pesos también pueden aparecer múltiples soluciones en las cuales no exista una preferencia clara por una u otra.

De forma clásica, las técnicas de decisión multicriterio se subdividen en dos grandes grupos (BARBA-ROMERO y POMEROL, 1997): las técnicas continuas o de programación lineal con criterios múltiples, en las que cualquier punto del espacio matemático n-dimensional puede ser la solución, siendo n el número de criterios utilizados; las técnicas discretas, en las que existe un número finito de soluciones posibles que deben ser evaluadas.

Entre las técnicas continuas la búsqueda de la solución óptima pasa por la aplicación de restricciones a los criterios o variables decisoras. Ejemplos muy interesantes de distintos métodos y aplicaciones de estas técnicas se pueden encontrar en ROMERO (1993).

Las técnicas discretas resultan, en nuestra opinión, de planteamiento más sencillo e intuitivo y su aplicabilidad se ha incrementado notablemente con la micro discretización del espacio que proporcionan los ficheros *raster* de los sistemas de información geográfica. Cada celda de uno de estos ficheros puede ser evaluada con respecto a los distintos criterios de decisión, obteniéndose su aptitud para un uso determinado. Las celdas de mayor aptitud o las que sobrepasen un determinado valor umbral formarán el conjunto espacial de la solución del problema.

En este trabajo se muestra un ejemplo de la aplicación de la decisión multicriterio discreta

(DMD) en la ordenación de una masa de encina y alcornoque en la Sierra Norte de Sevilla, para la selección de las zonas en las que debe priorizarse la regeneración. Estas masas sufren una importante presión sobre sus producciones de pasto, bellota, corcho y caza, y además deben prestar utilidades de protección, conservación de biodiversidad y calidad paisajística consecuentes con la pertenencia a un espacio natural protegido.

METODOLOGÍA

El trabajo se ha realizado en una finca situada en los TT.MM. de Constantina y de S. Nicolás del Puerto (Sevilla), dentro del P.N. Sierra Norte de Sevilla. Se trata de una masa mixta por rodales de encina y alcornoque con una superficie gestionable de 432 ha que se ha ordenado como un único cuartel. El uso principal de la finca es la ganadería porcina con algo de vacuno, así como la extracción del corcho.

En el cuartel se ha realizado un inventario mediante muestreo aleatorio, con el levantamiento de 11 parcelas de 18 m de radio en las zonas más densas y 56 parcelas de 20 m de radio en los espacios de menor densidad, con un total de 67 parcelas

Es conocida (BENITO, 1994) la incompatibilidad, a corto y medio plazo, de los usos principales en las masas mediterráneas de *Quercus* con la puesta en regeneración del arbolado. Esto hace precisa la localización cuidadosa de las zonas que vayan a destinarse al cumplimiento ineludible de la condición de persistencia de la masa, con el fin de minimizar las pérdidas productivas y actuar en las zonas que más lo necesiten. Estas zonas objetivo se han denominado “superficies de regeneración preferente” (SRP).

Los criterios de selección de SRP responden a las condiciones selvícolas y ecológicas de la masa, ya que, de forma previa, se han excluido las zonas de uso agrícola o uso ganadero intensivo, que podrían condicionar la elección desde otros puntos de vista. Los criterios utilizados han sido:

- Pies mayores contados en la parcela: se trata de un indicativo de la densidad del arbolado, muy importante para el futuro de la explotación forestal a corto y medio plazo, lo que convierte este criterio en prioritario para la propiedad de la finca.
- Área basimétrica en m² de sección de tronco medido a 1,3 m por ha; se ha escogido esta variable por su buena capacidad indicadora de la carga total de arbolado, que ha hecho que sea utilizada en múltiples investigaciones para la determinación de la densidad óptima en dehesas y montes densos de quercíneas.
- Presencia de árboles muy gruesos: en la definición de esta variable se ha tratado de estimar la cercanía al estado de decrepitud. Se ha tomado como atributo indicador el número de pies de las clases diamétricas de 45 cm en adelante en cada parcela.
- Regeneración: presencia de regenerado y de pies menores en la parcela, indicativa de la necesidad de proporcionar cuidados para la finalización de la regeneración.
- Pendiente: criterio complementario, indicador de la necesidad de protección vegetal frente a la erosión.
- Orientación: en combinación con la pendiente, este criterio es indicador de la cantidad de energía recibida por el terreno, lo que influye sobre su desecación, el riesgo de incendios, de erosión, etc.

A la vista de los criterios expuestos, antes de asignarles un peso, se deben tener en cuenta cuatro cuestiones:

La primera es que los criterios deben ser, en la medida de lo posible independientes; puede observarse que los tres primeros criterios no son totalmente independientes pero se han propuesto porque evalúan matices distintos desde un punto de vista selvícola. La situación de dependencia se palía en parte por la distinta asignación de pesos y porque el criterio de “árboles gruesos” tiene distinto signo a los otros dos. En cuanto a la pendiente y orientación, la relación existente entre ambos aconseja la elección de un único criterio combinado, según niveles de riesgo debido a la geomorfología.

La segunda cuestión es que las técnicas de evaluación multicriterio precisan que todos los criterios que se van a aplicar sean de maximización. Los dos primeros criterios serían de minimización para la selección de SRP, por lo que se sustituyen por su valor suplementario obtenido

hallando la diferencia entre el valor del criterio en cada punto y el valor máximo que toma este criterio en la zona de actuación.

La tercera cuestión es que todos los criterios deben valorarse en el mismo intervalo de variación, por lo que debe procederse a su normalización a un rango [0,1]. Esta normalización se hace dividiendo cada valor por el máximo que aparece dentro de cada criterio.

La última cuestión se centra en la metodología de asignación de pesos ponderales a cada criterio. Se trata de una de las decisiones más complejas ya que según la importancia que se asigne a cada criterio pueden variar fuertemente los resultados en cuanto a las zonas seleccionadas. En este caso se ha utilizado el método de los autovalores (*eigenvalues*) ya que proporciona una prueba matemática de consistencia en la asignación de los pesos. Un técnico que tenga bien definidas sus prioridades de gestión forestal puede perfectamente hacer una asignación de pesos de forma sencilla, por tasación directa de cada criterio, pudiendo llegar a resultados excelentes en su evaluación multicriterio.

El proceso final de definición de criterios y asignación de pesos se contempla en el cuadro 1.

Cuadro 1: Definición de criterios de valoración para priorizar la regeneración

CRITERIO	DEFINICIÓN	MAX./MIN.	CRº.NORMALIZADO
PM	Minimizar (Pies mayores/parcela). Se transforma en: Maximizar $(27\text{-pies_mays}/p^a)$	27/0	$\frac{(27\text{-pies_mays}/p^a)}{27}$
AB	Minimizar área basimétrica por ha. Se transforma en: Maximizar $(16\text{-area_bas_m}^2/\text{ha})$	16/0	$\frac{(16\text{-area_bas_m}^2/\text{ha})}{16}$
REG	Maximizar (regenerado+pies_menores) /parcela	101/0	$\frac{(\text{reg}+\text{pies_mens})/p^a}{101}$
VJ	Maximizar (pies/parcela de d.a.p.>45 cm)	5/0	$\frac{(\text{pies_dap}>45)/p^a}{5}$
RGO	Maximizar riesgo relieve tal que: Pte<20% → riesgo = 1 Pte<35% en umbría → riesgo = 1 Pte 20-35% en solana → riesgo = 2 Pte >35% en umbría → riesgo = 2 Pte >35% en solana → riesgo = 3	3/1	$\frac{\text{riesgo}}{3}$

Abreviaturas: d.a.p.: diámetro a la altura del pecho; Pte: pendiente en porcentaje; umbría: orientación de norte, de 300° a 360° y de 0° a 60°; solana: orientación sur, este y oeste, de 60° a 300°; MAX./MIN.: valores máximo y mínimo que toma el criterio en la zona de trabajo; p^a: parcela.

La asignación de pesos se hace comparando la importancia relativa entre dos criterios con el siguiente esquema (BARBA-ROMERO Y POMEROL, 1997):

Valor de b _{ij}	cuando el criterio i, al compararlo con el j es g	valor de b _{ji}
1	igualmente importante	1
3	ligeramente más importante	1/7
5	notablemente más importante	1/5
7	demostrablemente más importante	1/7
9	absolutamente más importante	1/9

La tabla de asignación de importancias admite todos los valores intermedios y se configura como sigue:

Cuadro 2: matriz de comparación de los pesos de los criterios dos a dos.

	PM	AB	REG	VJ	RGO	
PM	1	3	4	5	5	Así, se ha valorado que el criterio PM es 3 veces más importante que AB, 4 veces más que REG, etc.
AB	0,3333	1	1,5	2	2,5	
REG	0,25	0,6667	1	1,5	2	
VJ	0,2	0,5	0,6667	1	2	
RGO	0,2	0,4	0,5	0,5	1	

Se verificará que si B es la matriz de comparaciones y “w” el vector de pesos:

$$B*w = \lambda*w. \text{ Donde “}\lambda\text{” es un autovalor de la matriz de comparación.}$$

El valor calculado para λ es 5,056 y la prueba de inconsistencia da un coeficiente de inconsistencia de 0,0124. Dado que se consideran aceptables los coeficientes de inconsistencia por debajo de 0,1 se puede considerar la comparación de pesos como satisfactoria, por lo que resolviendo el sistema de ecuaciones: $B*w - \lambda*w=0$ se obtiene que el vector de pesos w es:

PESOS	CRITERIO	
w1=6,786638	PM	La resolución se ha realizado con la ayuda de una hoja de cálculo configurada al efecto. El fichero en formato Excel® puede solicitarse gratuitamente a los autores por correo electrónico
w2=2,584737	AB	
w3=1,874331	REG	
w4=1,454568	VJ	
w5=1	RGO	

Para realizar la valoración final se ha utilizado el método de la suma ponderada, tal que, la aptitud de un determinado punto para formar parte de la SRP queda establecida por la expresión:

$$\text{Aptitud SRP: } w1*PM+w2*AB+w3*REG+w4*VJ+w5*RGO$$

En el sistema de información geográfica se ha construido una capa matricial (*raster*) por cada uno de los criterios. La formación de estas capas proviene de los puntos de información que constituyen las parcelas, para los cuatro primeros criterios, y de la información altimétrica para el quinto criterio. La información puntual se ha extendido al terreno mediante interpolación entre parcelas, utilizando el inverso de la distancia al cuadrado como peso ponderal.

La capa final de valoración se obtiene mediante un álgebra de mapas que desarrolla la expresión “Aptitud SRP” indicada anteriormente.

El análisis de los resultados se realiza comparándolo con una aplicación no espacial de la metodología multicriterio y con una metodología monocriterio (área basimétrica).

RESULTADOS

La cartografía de aptitud desarrollada mediante la metodología multicriterio valora cada celda de 20x20 m del mapa, obteniéndose un rango de valores entre 1,3 y 9,7. Por cantones el resultado puede apreciarse en la tabla 1.

El método está ideado para señalar las zonas problemáticas, ya sean los problemas por alguna causa puntual, como combinaciones de causas con baja incidencia si se contabilizan por separado. Sin embargo, puede apreciarse en la tabla 1 y la figura 1 que el método multicriterio puede ayudar a la confección de un tramo en regeneración, que debería abarcar las zonas que hayan obtenido las mayores puntuaciones en cuanto a su necesidad de ser regeneradas.

También puede apreciarse, con la observación de las capas correspondientes a los distintos criterios de valoración, que se amortigua mucho el efecto de “burbujas” característico de las interpolaciones espaciales a partir de nubes de puntos. Este efecto es muy patente si se interpola, desde cada parcela, la valoración final de aptitud calculada numéricamente (figura 2), aunque queda algo mitigado si el criterio de riesgo geomorfológico se añade mediante álgebra de mapas (figura 3).

Si se compara los resultados obtenidos en la valoración multicriterio final (figura 1) con una valoración monocriterio como podría ser la variable área basimétrica (figura 4) se aprecia la notable diferencia existente, generada por la consideración de otros problemas que puedan presentarse, que podrían consultarse en el resto de las capas expuestas en las figuras 5 a 8.

DISCUSIÓN

La aplicación de métodos multicriterio para la clasificación espacial se muestra como una herramienta muy eficaz para la localización de necesidades de actuación en gestión forestal y, en concreto, para la localización de superficies que precisen urgente regeneración.

Un inventario forestal bien realizado y con las parcelas de muestreo bien georreferenciadas es condición necesaria para la aplicación de técnicas de interpolación espacial. Por otro lado, la información de las parcelas puede completarse con datos de fotointerpretación o la localización de rodales realizada en la descripción de las unidades inventariables.

La mezcla espacial de criterios amortigua notablemente el efecto de distribución concéntrica

resultante de la interpolación de un solo criterio.

En la aplicación del método se han observado problemas a los que se debe prestar atención. Uno de ellos es la existencia de valores altos, muy fuera del rango de valores normales. Al normalizar, estos valores máximos hacen insignificantes el resto de los valores con lo que, en la práctica, le quitan peso al criterio al que corresponden; para solventar este problema puede realizarse una ecualización previa de los rangos de valores corrigiendo los que se salgan de la distribución en más de 2 a 3 desviaciones típicas.

Otro problema es la definición de criterios de decisión independientes y su asignación de pesos. En este proceso se considera conveniente incorporar la mayor participación posible, lo que incluiría las opiniones del propietario, los técnicos, los ganaderos y otros usuarios o receptores de externalidades del medio forestal que se estudia.

Una última pega es que la valoración multicriterio puede detectar las zonas más problemáticas, pero no realiza un diagnóstico o identificación clara del problema, por lo que se ha de recurrir a los contenidos de las otras capas de información para descubrir la causa de la priorización de una zona para su regeneración.

Otra posibilidad que puede resultar de utilidad en planificación y gestión forestal es la selección previa de zonas elegibles con aquellos criterios de mayor importancia, para pasar posteriormente a una elección fina, utilizando las técnicas multicriterio.

La valoración de la aptitud como SRP de forma numérica, para cada parcela, con la posterior interpolación espacial no contempla los mismos matices que la interpolación y combinación posterior de capas, por lo que resulta menos aconsejable, con una salvedad: la variable de aptitud obtenida suele tener unos gradientes de variación espacial más suaves, lo que permite la aplicación de técnicas geoestadísticas más sofisticadas que la simple interpolación, como serían el *kriging* o el *cokriging* en sus muy diversas variantes. La conveniencia del uso de estos modelos es sin duda un tema apasionante de discusión.

BIBLIOGRAFÍA

- BARBA-ROMERO, S. y POMEROL J.C., 1997. *Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Colección de Economía. Universidad de Alcalá. Madrid. 420 pp.
- BENITO, N. DE, 1994. Ordenación de alcornocales. En: Madrigal, A., *Ordenación de Montes Arbolados*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA: Colección Técnica. Madrid. 375 pp.
- ROMERO, C., 1993. *Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Universidad Textos. Alianza Editorial. Madrid. 195 pp.

Tabla 1. Valoración de SRP agrupada por cantones y ordenada de mayor a menor preferencia.

CANTÓN	SUP (ha)	Val. mínimo	Val.máximo	Rango	Media	Desv.Std	%Superf	%Sup_acum
2	39,5	5,8	7,4	1,6	6,6	0,3	9,13	9,13
5	43,0	4,1	9,7	5,6	6,3	0,5	9,94	19,07
4	43,5	5,1	7,1	2,0	6,1	0,4	10,05	29,13
3	27,2	4,1	8,1	4,1	5,9	0,7	6,29	35,41
10	30,2	4,8	6,6	1,8	5,8	0,4	6,99	42,41
6	62,0	4,1	7,2	3,1	5,6	0,5	14,34	56,74
1	52,3	3,1	8,1	5,0	5,3	0,9	12,09	68,83
8	71,2	1,7	7,0	5,3	5,1	0,8	16,45	85,28
9	63,6	1,4	7,0	5,6	5,0	0,9	14,72	100,00

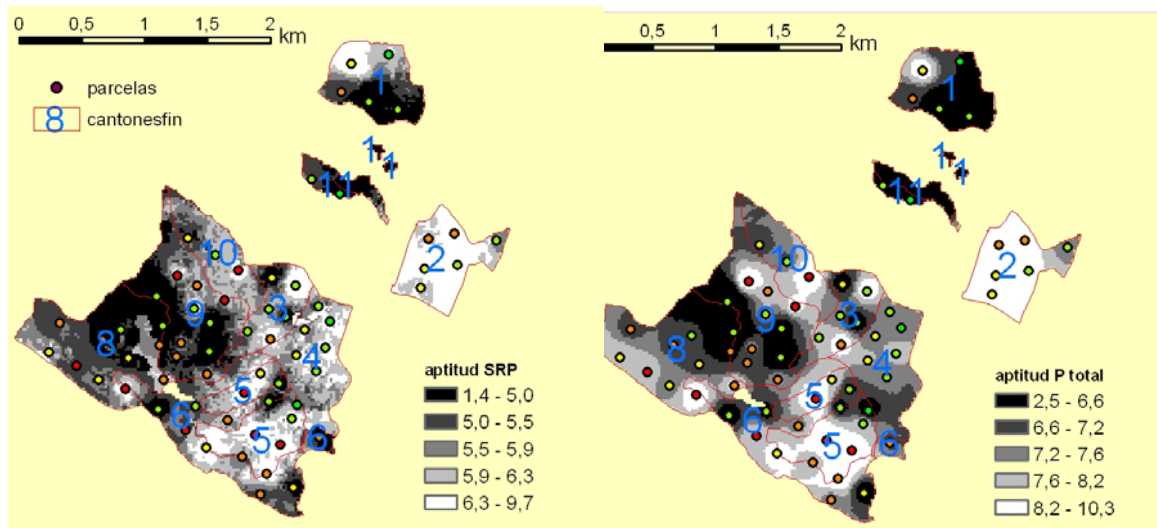


Figura 1. Distribución de aptitud como SRP según intervalos de percentil 20. Obtenida como suma ponderada de capas cartográficas

Figura 2. Aptitud como SRP obtenida mediante interpolación de la valoración multicriterio de cada parcela (intervalos de percentil 20)

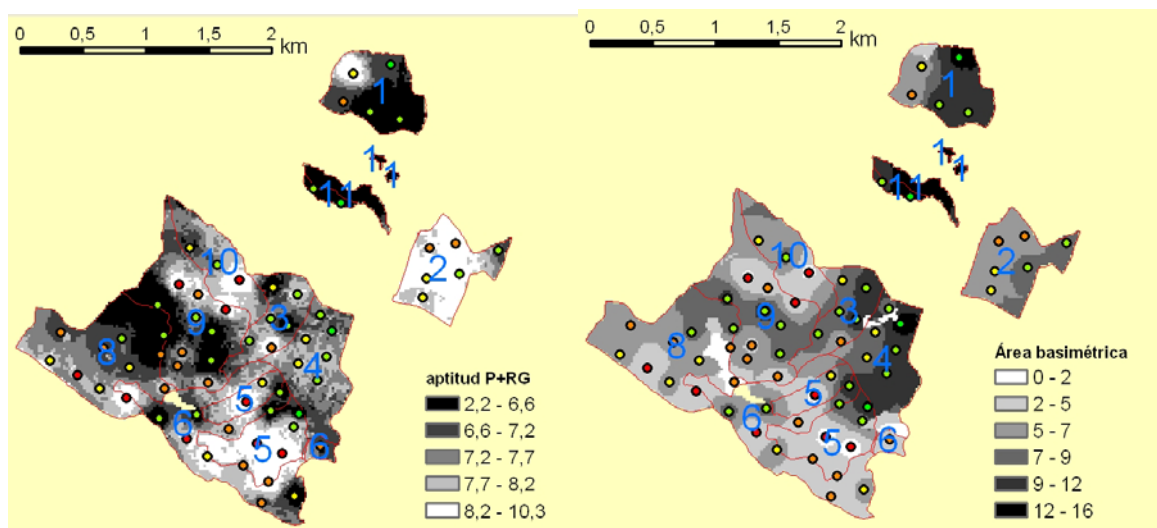


Figura 3. Aptitud como SRP interpolada desde los valores de parcelas a excepción de los riesgos geomorfológicos que se suman de forma cartográfica

Figura 4. Capa monocriterio de localización de áreas defectivas en cuanto a área basimétrica.

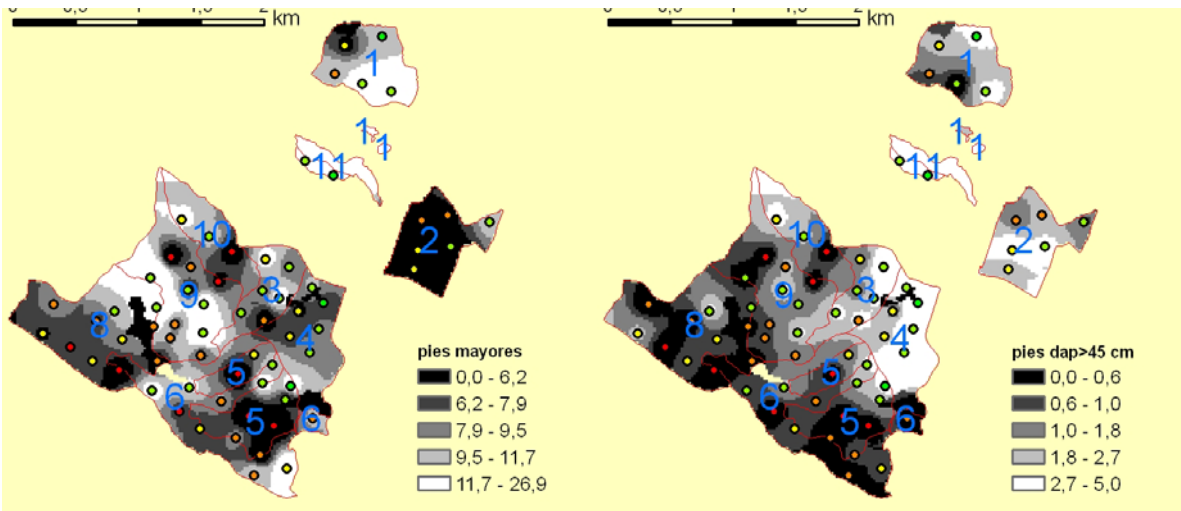


Figura 5. Pies mayores por parcela, la ausencia de pies mayores es el criterio al que se le aplica el coeficiente de ponderación más alto

Figura 6. Presencia de pies de diámetro mayor de 45 cm, como criterio indicador de cercanía al turno físico-tecnológico en la parcela

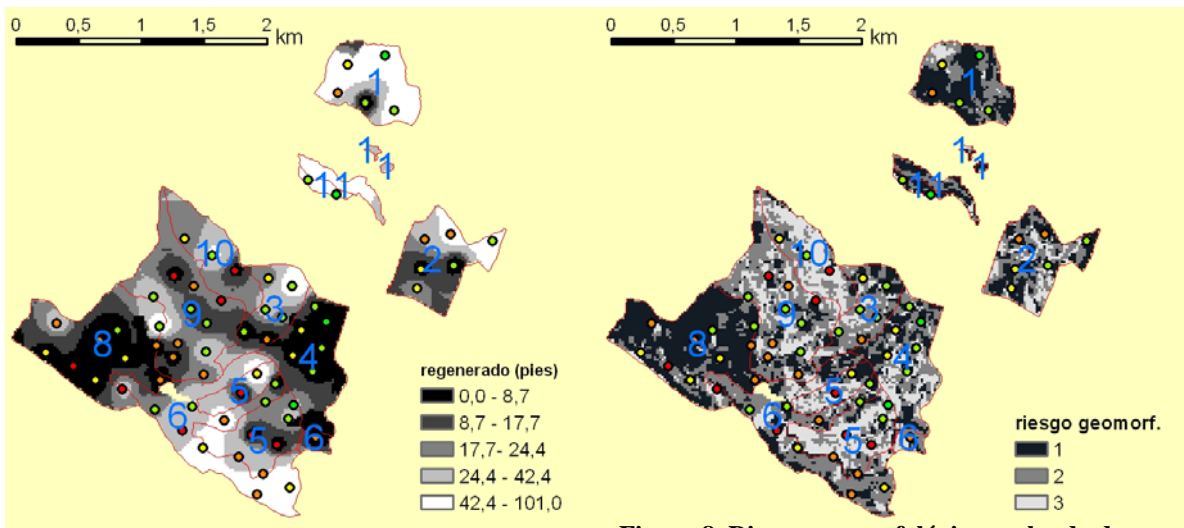


Figura 7. Abundancia de regenerado y pies menores en la parcela como indicativo de necesidad de protección o de finalización del periodo de regeneración.

Figura 8. Riesgo geomorfológico evaluado de forma ordinal en función de la pendiente y la orientación, como criterio indicador de necesidad de protección.