

# APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ESTACIÓN FORESTAL O SITIO

Juan José Guerrero Álvarez<sup>(1)</sup>, Manuel Hernández Martínez<sup>(1)</sup>.

(1) EGMASA. Johan G. Gutenberg, s/n. Isla de la Cartuja. 41092. Sevilla.  
[jjguerrero@egmasa.es](mailto:jjguerrero@egmasa.es)

## Palabras clave:

Estación Forestal, Sitio, SIG, Variables Ecológicas, Análisis Discriminante, Área Potencial de Especie Forestales, Balance Hídrico.

## Resumen:

Se describe un procedimiento metodológico que aglutina diversos métodos que finalmente convergen en la estimación de la distribución territorial de la calidad de estación forestal o sitio en base a multitud de variables ecológicas tales como insolación, régimen hídrico, características edáficas, etc. Esta metodología es aplicable mediante el uso de tecnología SIG, utilizando diversas aplicaciones desarrolladas para este propósito. El resultado final consiste en la distribución territorial de la calidad de estación de una determinada especie forestal, o sitio ecológico, si el estudio se realiza de manera genérica, sin tener en cuenta la especie.

## INTRODUCCIÓN

Esta metodología surgió ante la necesidad de estimar a escala de reconocimiento, las existencias de madera y producción de un área extensa de *Andalucía oriental*, con vistas a la instalación de una planta transformadora de madera, así como la realización de los tratamientos silvícolas necesarios en las masas artificiales de pino. El área considerada está constituida por grandes extensiones de bosque de *pino carrasco* (*Pinus halepensis* Miller), *pino negral* (*P. pinaster* Sol. in Aiton), *pino silvestre* (*P. sylvestris* L.) y *pino negro* (*P. nigra* Arnold), procedentes de las repoblaciones efectuadas entre los años 50 y 60 del siglo pasado, en las serranías de *Sierra Nevada*, *Sierra de Filabres* y *Baza*, y *Sierra de Huétor*. Esporádicamente se encuentran también rodales de pino piñonero (*P. pinea* L.), pino canario (*P. canariensis* Sweet ex Sprengel) y pino moro (*P. uncinata* Miller ex Mirbel).

En el mencionado trabajo, se empleó la calidad de estación obtenida como una división del territorio en clases homogéneas de producción, con el fin de utilizarlas en el proceso de extrapolación de los datos de inventario. Este artículo describe la metodología seguida y expone algunos de los resultados.

## FUNDAMENTOS

### *Calidad de estación forestal*

Por definición la *calidad de la estación forestal o sitio* para una especie forestal determinada, consiste en un valor, índice o clasificación que identifica directamente la capacidad productiva de un biotopo en referencia a dicha especie. Estrictamente, la capacidad productiva identificada por la calidad de la estación forestal, se refiere al conjunto de la biomasa del bosque, pero es generalmente asimilada al volumen de madera producido a lo largo del ciclo productivo, por constituir el mayor porcentaje de la biomasa.

Es muy importante señalar que el concepto de calidad de estación forestal está ligado a una serie de suposiciones y referencias como son la especie forestal y estructura de la masa, la cual debe ser regular, normal, monoespecífica y con alta fracción de cabida cubierta. Sin embargo, es posible hablar de una calidad de estación forestal genérica e inherente a la especie o estructura del bosque, siempre que se haga referencia a la especie o comunidad que mejor explota los recursos del sitio, así como relacionarla con masas de estructura más complejas en etapas maduras. A esto es necesario añadir que la capacidad productiva de un sitio es referida al potencial de producción considerando un manejo apropiado de la masa, de tal manera que la estructura del bosque permita un aprovechamiento óptimo de los recursos ambientales: luz, agua y nutrientes.

### *Producción máxima del ecosistema e indicadores de calidad forestal*

En la práctica, conocer la capacidad productiva de un sitio mediante de la medición directa del volumen de biomasa producido en la etapa más madura del ecosistema, es sin duda una labor de

extraordinaria dificultad. Es por este motivo que para estimar la calidad del sitio sea necesario recurrir a correlaciones indirectas que permitan vincularla con algún parámetro de la masa de fácil medición, a la vez que sea independiente del resto de características de la masa.

Para ello, el método más extendido y que ha dado mejores resultados es el que utiliza la altura de los árboles como índice de calidad de estación forestal. En efecto, se parte de la certeza experimental de que la altura de los árboles de una masa coetánea para una especie y edad determinada, está más correlacionada con la capacidad productiva que ningún otro parámetro de la masa. Así mismo, este parámetro es relativamente independiente de factores tales como densidad de pies, área basimétrica, tratamientos silvícolas, etc. Según la *ley de Eichhorn*, la producción total en volumen de masas regulares de una especie dada dentro de una región climática homogénea es, esencialmente, función de la altura.

Por otra parte, investigaciones posteriores a esta ley matizan que:

Se adapta mejor a masas de coníferas que a frondosas

La ley es válida para masas de densidad correspondiente a los límites del área basimétrica definida por *Assman (1970)*.

En cuanto a la edad más propicia para determinar la altura con la que definir la calidad forestal. A menudo se emplea una clasificación continua, basada en la altura alcanzada a una edad de referencia, generalmente relacionada con el turno (*índice de sitio*). Otras veces, sin embargo se emplea una clasificación discreta, que consiste en ordenar y agrupar las familias de curvas de calidad en varias clases (Figura 1).

### PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Los procedimientos recién descritos son, por sí solos, insuficientes para la realización de estudios territoriales, dado que no es posible obtener datos de capacidad productora en todos aquellos lugares donde no existen bosques coetáneos de las especies que nos interesan. De esta forma, surge la necesidad de relacionar la calidad del *sitio* con otros factores cuya distribución territorial es conocida. Para sortear este obstáculo existen dos enfoques posibles; el primero se basa en el estudio de bioindicadores, ya sean especies o comunidades, que se relacionen de manera significativa con la calidad de la estación, y el segundo – usado en esta metodología – consistente en el estudio y análisis de las variables del biotopo que inciden directamente sobre el crecimiento de la masa (orográficos, climáticos, edáficos, etc).

De manera genérica se puede representar este procedimiento como

$$CEF = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Ecuación 1}$$

siendo *CEF* la calidad de estación forestal (I, II, III, ...) y  $x_i$  las variables del biotopo consideradas.

La determinación de la función *f* se realiza mediante la aplicación de una técnica estadística conocida como análisis discriminante.

#### **Análisis discriminante**

El análisis discriminante es una técnica estadística de análisis multivariante en la que se clasifican probabilísticamente, en grupos prefijados, una serie de elementos, basándose en un conjunto de variables cuantitativas medidas sobre éstos y una serie de elementos de control (*análisis discriminante predictivo*). Esta técnicas ha sido y sigue siendo muy utilizada en la clasificación supervisada de imágenes de satélite. En nuestro caso el elemento a clasificar es cada parcela del territorio (que serán las celdas de una serie de mapas raster), los grupos prefijados son las clases de calidad establecidas (I,II,II y IV) y las mediciones serán las de las variables seleccionadas del biotopo.

Las reglas de clasificación desarrolladas son diversas, optándose en este trabajo por emplear el algoritmo usado por el *Método de Máxima Verosimilitud (Maximun Likelihood/Bayesian)*, cuyo clasificador es el siguiente:

$$D_c = \ln(a_c) - \frac{1}{2} \left( \ln(|\mathbf{C}_c|) + (\bar{\mathbf{X}} - \bar{\mathbf{M}}_c)^T \times (\mathbf{C}_c)^{-1} \times (\bar{\mathbf{X}} - \bar{\mathbf{M}}_c) \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde  $D_c$  es la función discriminante, que valora la distancia al centro de la clase *c*,  $a_c$  es la probabilidad *a priori* de pertenecer a la clase *c*,  $\mathbf{C}_c$  es la matriz de covarianzas de la clase *c*,  $\bar{\mathbf{M}}_c$  es el vector de valores medios de la clase *c* y  $\bar{\mathbf{X}}$  es el vector de variables  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

La aplicación de esta expresión a las *m* clases definidas en la clasificación de los puntos de

control, permite obtener un conjunto de expresiones polinómicas de segundo grado en función de las  $n$  variables  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , con las que se pretende explicar el fenómeno:

$$D_c = f_c(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_c(\vec{X}) \quad \text{Ecuación 3}$$

y, a continuación, a partir de estas *funciones discriminantes* la determinación de las *funciones de probabilidad*, que nos indicarán la probabilidad de que una parcela, con un conjunto de valores,  $\vec{X}$ , pertenezca a la clase  $c$ :

$$P_c = e^{-\frac{1}{2}f_c(\vec{X})} \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta última expresión permite extrapolar al terreno una clasificación propuesta, a partir de los valores de las variables relacionadas, asignando en cada lugar la clase a la que existe una mayor probabilidad de pertenencia, siempre que supere una probabilidad mínima de asignación (Figura 2); también permite cuantificar el grado de explicación que ofrece cada una de las variables del fenómeno que se pretende estudiar.

#### ***Fuentes de error en la clasificación***

Se puede hablar de una serie de errores intrínsecos a esta metodología, independiente de las limitaciones de las fuentes de información usadas. Conocer las posibles causas de estos errores es fundamental para la interpretación de los resultados:

- Errores de muestreo en la toma de datos en las parcelas de control (diámetro, altura y edad), fundamentales para la correcta clasificación de la calidad de la masa.
- Imprecisiones en la localización de las coordenadas de la parcela de control. Muy significativo cuando son utilizadas variables del biotopo que en pocos metros experimentan gran variación (insolación, distribución del agua en el suelo, etc).
- La elección de masas de escasa edad puede falsear la clasificación de la calidad de la masa forestal.
- Calidad de estación forestal falseada al tomar parcelas de control con alta densidad o tratamientos selvícolas inadecuados al método.
- Elección de masas procedentes de repoblaciones mal diseñadas.
- Omisión de una o más variables que expliquen significativamente la relación entre el sitio y capacidad productiva, lo que da lugar a una baja probabilidad de asignación a la categoría.
- Exclusión de alguna categoría de la clasificación o excesiva distinción de grupos; es muy importante durante la realización del análisis discriminante probar diferentes agrupaciones hasta dar con unos resultados más satisfactorios.

### **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

#### ***Determinación de los factores ecológicos***

La información de los factores ecológicos considerados en este trabajo de importancia para la valoración de la calidad de estación procede en buena parte de fuentes de información publicadas por diversas consejerías de la Junta de Andalucía, y en parte de la aplicación de modelos o análisis más o menos complejos.

En el primer grupo se hallan:

- Modelo digital de elevaciones a escala 1:50.000. C<sup>a</sup> de Medio Ambiente, Junta de Andalucía; modelo raster de 50 m de resolución espacial.
- Variables edáficas. La información se obtiene de la cobertura de suelos. Las variables edáficas escogidas para el estudio de la capacidad productiva son la *textura*, *concentración de carbonatos activos*, *reacción o pH del suelo* y *capacidad de almacenamiento de agua*.

Entre aquellas que se obtienen por medio de análisis se hallan:

- Pendiente y exposición, obtenida directamente del MDE.
- Parámetros climáticos, a partir de los modelos de estimación climática incluidos en el trabajo "*Modelos y cartografía de estimaciones climáticas termopluviométricas para la España Peninsular*" (Sánchez Palomares *et. al.*, 1999), así como trabajos posteriores que lo completan y que correlacionan diversas variables con la altitud y la ubicación dentro de un conjunto de cuencas homogéneas, por procedimientos estadísticos. Las variables evaluadas fueron: precipitaciones mensuales, temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales y evapotranspiración potencial.

Finalmente, destacaremos un grupo de componentes ecológicas que son de cálculo especialmente complejo, lo obliga a recurrir a modelos de simulación cuya descripción detallada excede de propósitos de este artículo, y que se basan en algoritmos que integran *análisis raster* y *programación en sistemas de información geográfica*; estas variables son la *insolación*, y las responsables de los gradientes ecológicos en ladera, aparición de áreas *intrazonales*, etc, cuyo estudio territorial se basa en análisis del *balance hídrico* en el conjunto del ecosistema.

Para estimar la insolación se usa un modelo de simulación que reproduce fielmente el movimiento aparente diario del Sol por la esfera celeste, en una latitud y mes determinado; el resultado depende de la pendiente, orientación y proyección de sombras. Al aplicar este modelo mediante el uso de *SIG*, se puede obtener un indicador de la cantidad de energía recibida a lo largo de un mes, y por consiguiente la estimación media anual, cuyo valor puede normalizarse a un índice. En este trabajo, la insolación anual se traduce a un *modelo digital de iluminación* donde cada punto del terreno almacena el número medio de horas de insolación directa recibidas al día.

El análisis del balance hídrico ha requerido el levantamiento de una metodología para la simulación del balance hídrico mensual teniendo en cuenta los fenómenos de precipitación, escorrentía, evapotranspiración, capacidad de campo, infiltración y flujo subsuperficial (Figura 3), considerando que en cada punto se cumple la igualdad:

$$P \times (1 - c_e) - ETR + C_i + I_e - I_s - PC = C_f \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $P$  representa la precipitación mensual,  $c_e$  es el coeficiente de escorrentía,  $ETR$  es la evapotranspiración real mensual,  $C_i$  es la cantidad inicial de agua almacenada en el suelo,  $I_e$  e  $I_s$  representan los flujos subsuperficiales de entrada y salida a la unidad de análisis (mensualmente),  $PC$  se introduce para considerar el flujo de precolación y  $C_f$  es la cantidad de agua almacenada tras el balance mensual.

De este análisis resultan aproximaciones a factores tan relevante para la vegetación como:

- evolución anual del caudal base de arroyos y ríos
- evolución anual de la evapotranspiración real
- evolución anual del contenido de agua en el suelo (número de meses con agua en el suelo) (Figura 4)

#### ***Delimitación del área de estudio: distribuciones potenciales***

La estimación de la distribución potencial de las especies forestales objeto de este trabajo, tiene como objetivo definir y restringir el entorno de análisis de la calidad de estación forestal a las áreas donde la especie vegeta correctamente, evitando posibles errores del método de estimación de calidad en áreas donde existe alguna variable ecológica limitante. Dado que el estudio territorial de calidad de estación forestal se limita a unas pocas variables ecológicas es posible incurrir en errores al clasificar áreas con algún parámetro ecológico extramarginal, o excesivas variables marginales.

Se ha optado por una metodología que ha dado muy buenos resultados, basada en una caracterización paramétrica de los biotopos ocupados por parcelas de control donde se sabe que prospera la especie estudiada, para después realizar una extrapolación de lo observado al resto del territorio (Gandullo y Sánchez, 1994; Gómez *et al.*, 2002). Esta metodología consiste en determinar, en una red representativa de parcelas de la especie en estudio, la distribución de los valores de una variable cualquiera. El método define como intervalos *extramarginales* los que se encuentran fuera del rango de valores obtenido, *marginales máximo* y *mínimo*, a los definidos por los cuantiles del 10% y el 90% de las parcelas, y el intervalo *óptimo* como el definido por la parte central de la distribución (80% central de las parcelas) (Figura 5). La *distribución óptima* de la especie quedaría definida por el área donde todas las variables ecológicas consideradas son óptimas, mientras que la *potencial* sería la definida por el área con un número determinado de variables ecológicas óptimas.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos para *P. sylvestris*.

#### ***Selección de Parcelas del IFN-II***

Para cada una de las cuatro especies de pino, han sido seleccionadas las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional (*IFN-II*) que datan de su presencia. De esta selección han sido rechazadas todas aquellas parcelas que correspondan a masas irregulares (no coetáneas en edad), la masa no supera los 15 años de edad y la especie no se encuentra en un porcentaje representativo.

#### ***Clasificación de la Calidad de la Masa de las Parcelas***

El segundo paso consiste en clasificar la calidad de la masa usando para ello las *curvas de*

calidad de altura-edad de la masa definidas por Pita Carpenter para el *Pinus sylvestris*, *P. nigra*, *P. pinaster* y *P. halepensis*. El parámetro de altura considerado para la clasificación ha sido la altura media de la masa. Para este trabajo se observó que se obtenían mejores resultados fusionando las dos clases de peor calidad del trabajo de Pita en una.

### Resultados

La siguiente tabla (Tabla 2) resume la clasificación realizada de las parcelas del IFN-II, y que fueron utilizadas como parcelas de control.

Al aplicar el análisis discriminante con las variables Insolación (*I*), altitud (*A*) y agua disponible (*H*) se determinó el siguiente conjunto de funciones discriminantes para *P. sylvestris* (ver Ecuación 3):

$$D_c = a_0 + a_1I + a_2A + a_3H + a_4I^2 + a_5A^2 + a_6H^2 + a_7IA + a_8IH + a_9AH \quad \text{Ecuación 6}$$

Tras esto se aplican las ecuaciones a todo el territorio mediante análisis raster y se determina en cada lugar la clase para la que existe mayor probabilidad de pertenencia con lo que se obtuvo la siguiente distribución de calidades por especie (Tabla 3).

La Figura 7 muestra, a modo de ejemplo, el resultado de la zonificación de calidades de estación para *P. sylvestris*.

### Conclusiones

La elaboración de un modelo de producción territorial de estas características, es un apoyo muy importante a la hora de realizar la gestión del territorio. Sus aplicaciones son muy amplias: restauración forestal, selvicultura, ordenación de montes y del territorio, planes de ordenación de recursos naturales, etc. En el caso concreto de este trabajo el objetivo era la localización de materia prima para la industria de madera.

Sin embargo, también es importante dejar claras sus limitaciones. Aunque la metodología es muy robusta y se asienta en fundamentos ecológicos y estadísticos, son muchas las mejoras posibles, las más importantes: la baja intensidad de la red de inventario utilizada y la escasa información geográfica relacionada con las características del suelo. Es por este motivo por lo que es muy importante interpretar los resultados aquí expuestos como una tendencia de la distribución territorial, más que como una certeza.

### BIBLIOGRAFÍA

- ASSMANN, E. (1970). *The Principles of Forest Yield Study*. Pergamon Press, New York.
- GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ, O. (1994). *Estaciones Ecológicas de los Pinares Españoles*. Colección Técnica, ICONA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- GÓMEZ SANZ, V.; BLANCO ANDRAY, A.; SANCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO SANCHEZ, A.; ELENA ROSSELLÓ, R.; GRAÑA DOMINGUEZ, D. (2002). *Autoecología de los castañares andaluces en Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. págs: 205 – 226
- SÁNCHEZ PALOMARES, O.; SÁNCHEZ SERRANO, F.; CARRETERO CARRERO, M<sup>a</sup> P. (1999). *Modelos y cartografía de estimaciones climáticas termoplumiométricas para la España peninsular*. M<sup>o</sup> de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid.

Especie	Superficie Potencial	Porcentaje respecto al ámbito
<i>Pinus sylvestris</i>	188.134 ha	30,6 %
<i>Pinus nigra</i>	253.594 ha	41,4 %
<i>Pinus pinaster</i>	204.289 ha	33,1 %
<i>Pinus halepensis</i>	414.260 ha	67,2%

Tabla 1 Superficie potencial de las diferentes especies presentes en la zona de estudio

Especie	Calidad de estación forestal				Total
	I	II	III	IV	
<i>Pinus sylvestris</i>	28	82	70	8	188
<i>Pinus nigra</i>	59	71	56	7	256
<i>Pinus pinaster</i>	2	6	22	60	90

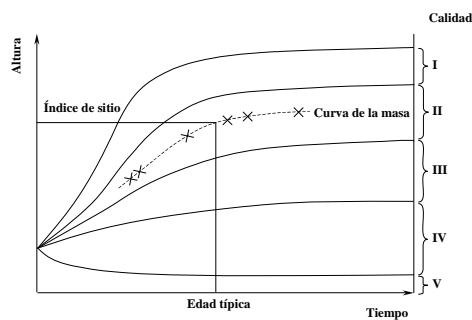
**Tabla 2 Número de parcelas**

Calidad	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$
I	216,8	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$-1,9 \cdot 10^{-1}$	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$-6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
II	131,9	$-9,1 \cdot 10^{-3}$	$-2,2 \cdot 10^{-2}$	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$-2,1 \cdot 10^{-4}$	0	$6,0 \cdot 10^{-6}$
III	74,6	$-5,8 \cdot 10^{-1}$	$-3,9 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0	$-6,6 \cdot 10^{-5}$	$-2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
IV	132,9	$-7,7 \cdot 10^{-1}$	$-3,6 \cdot 10^{-2}$	0	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0	$-1,4 \cdot 10^{-5}$	0	0

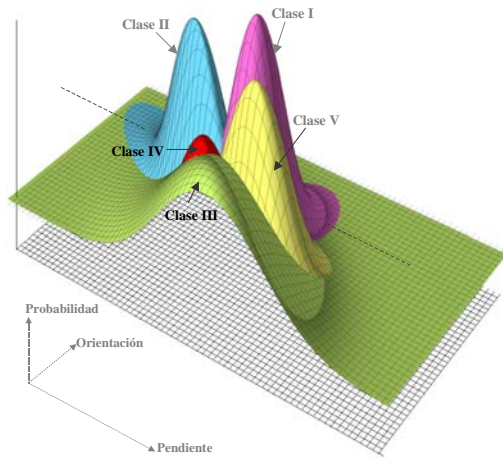
**Tabla 3. Coeficientes de las funciones discriminantes para *Pinus sylvestris* L.**

Especie	Calidad de estación forestal			
	I	II	III	IV
<i>Pinus sylvestris</i>	23.142 ha	7.825 ha	129.864 ha	27.303 ha
<i>Pinus nigra</i>	24.207 ha	126.496 ha	44.798 ha	58.092 ha
<i>Pinus pinaster</i>	11.950 ha	150.719 ha	18.777 ha	22.842 ha
<i>Pinus halepensis</i>	103.706 ha	205.351 ha	105.203 ha	0 ha

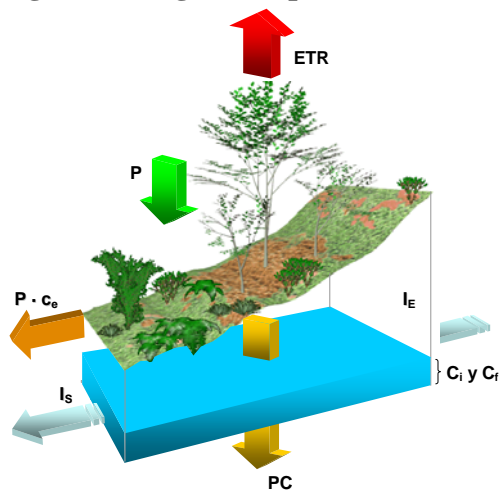
**Tabla 4 Superficie por clase de calidad de estación y especie**



**Figura 1. Curvas de calidad: índice de sitio y clases de calidad**



**Figura 2. Asignación probabilística mediante análisis discriminante**



### Figura 3. Esquema de balance hídrico

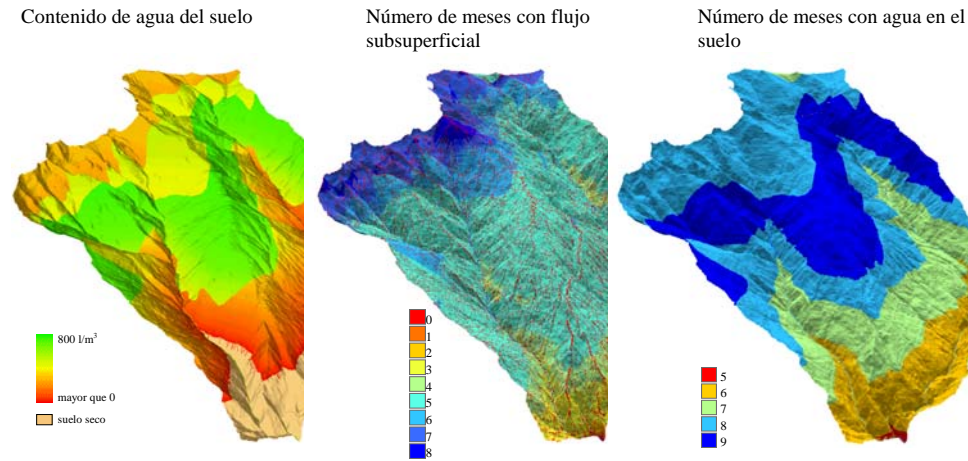


Figura 4. Algunos resultados de la aplicación del modelo de balance hídrico

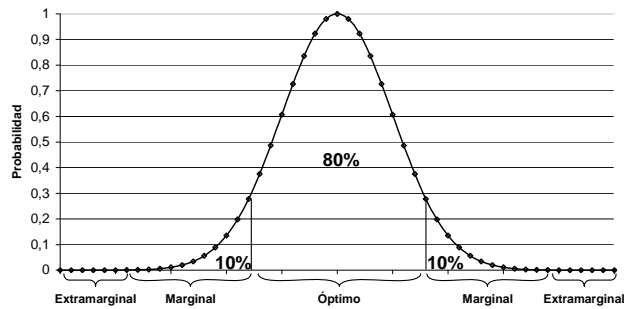


Figura 5. Determinación de la distribución potencial

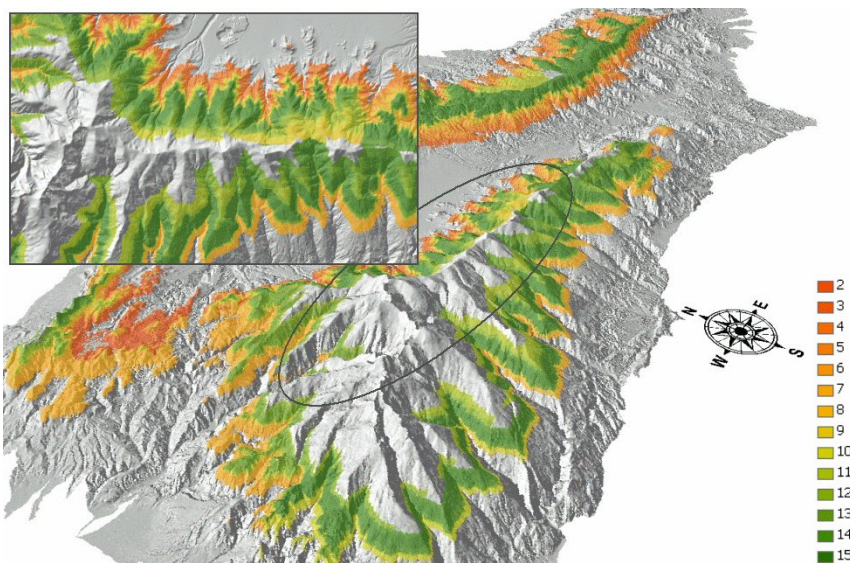
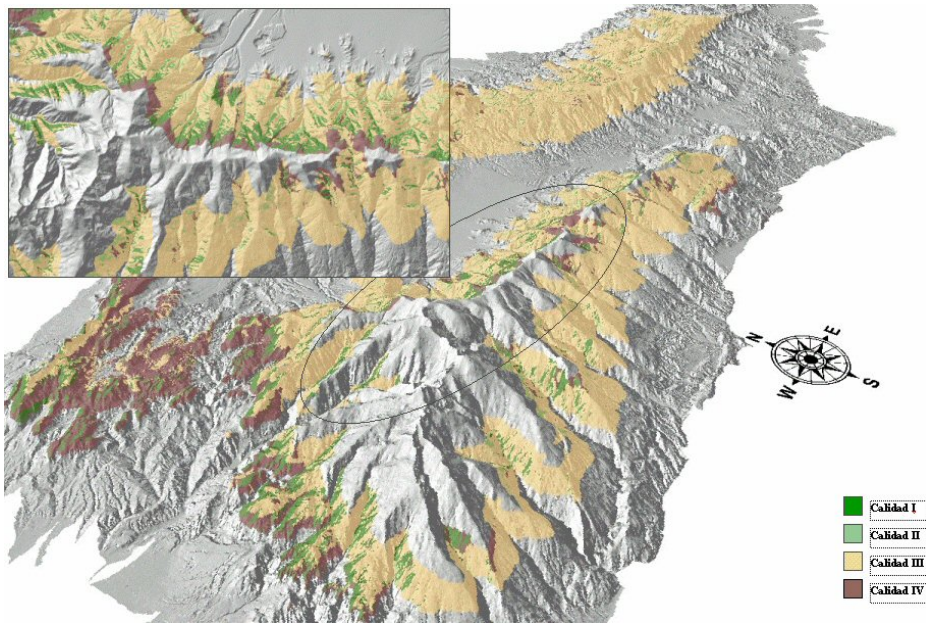


Figura 6. Distribución potencial de *Pinus sylvestris* L. Número de parámetros ecológicos óptimos.



**Figura 7. Clases de calidad para *Pinus sylvestris* L.**