

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
Facultad de Geografía e Historia



MASTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
(2010-2011)

DECISIÓN MULTICRITERIO BOOLEANA, PROBABILÍSTICA
Y POSIBILÍSTICA BORROSA DE LA DISTRIBUCIÓN DE
ABIES PINSAPO BOISS.

Autora : **Verónica Bonis Martín**

Director : **Luis Garmendia Salvador**

Codirector : **Alfonso Garmendia Salvador**

Resumen

El pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.), catalogada como en peligro de extinción, es una de las especies vegetales más singulares en la Península. En el presente trabajo se revisa su superficie actual de ocupación y se calcula su distribución potencial de forma comparativa mediante diferentes técnicas multicriterio en las provincias de Cádiz y Málaga y en particular en sus tres principales localizaciones (Sierra de Grazalema, Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja). Para ello se utilizan como indicadores la precipitación anual acumulada, altitud, orientación, precipitación mínima y Compound Topographic Index (-índice para representar la capacidad del suelo para retener agua-). Las técnicas utilizadas (análisis booleano, suma lineal ponderada y asignación y superposición borrosa) muestran un resultado considerablemente diferente para la distribución potencial del pinsapo pero todos señalan una elevada potencialidad de desarrollo en zonas situadas fuera de las principales figuras de protección y una ocupación actual mucho menor que su área potencial.

Palabras clave : *Abies pinsapo*, distribución potencial, multicriterio, lógica borrosa

Agradecimientos al tutor y cotutor del trabajo, por su inestimable y desinteresada ayuda en la realización del mismo, a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y al I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria) por proporcionar una importante parte de la información digital utilizada.

Índice

1- Introducción	13
1. 1.- El <i>Abies pinsapo</i> y su hábitat.....	14
1.1.1 Parque Natural de Sierra de las Nieves	16
1.1.2 Parque Natural de la Sierra de Grazalema	17
1.1.3 Paraje Natural de Sierra Bermeja.....	18
1.1.4 Estado de conservación.....	19
1.2 Métodos multicriterio (EMC)	21
1.3 Lógica Borrosa	27
1.3.1. Herramientas disponibles en ArcGis 10 para implementación de lógica borrosa	30
2- Material y métodos.....	33
2.1 Producción de la información básica	33
2.1.1. Obtención de la distribución actual de <i>Abies pinsapo</i>	33
2.1.2 Modelo Digital del Terreno	36
2.1.3 Datos climáticos	37
2.2. Selección de variables	38
3. Obtención del mapa de distribución potencial de <i>Abies pinsapo</i>	42
3.1. Obtención del mapa de distribución potencial de <i>A. pinsapo</i> mediante creación de capas booleanas.	42
3.1.1. Modelo de análisis mediante capas booleanas	43
3.2. Obtención del mapa de distribución potencial de <i>A. pinsapo</i> mediante comparación por pares Saaty y Suma Lineal Ponderada	44
3.2.1 Asignación de pesos mediante comparación por pares	44
3.2.2. Suma Lineal Ponderada.....	47
3.2.3. Modelo de análisis mediante comparación por pares y suma lineal ponderada	48

3.3. Obtención de la distribución potencial de <i>A. pinsapo</i> mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa	49
3.3.1. Asignación de pertenencia borrosa.....	49
3.3.2. Superposición borrosa	52
3.3.4. Modelo de análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.....	54
4-Resultados.....	55
5-Comparación de resultados y conclusiones.....	59
6-Bibliografía	63
ANEXO A.....	65

Lista de figuras

Figura 1: Distribución de <i>Abies pinsapo</i> en la Península.....	15
Figura 2: Parque Natural de Sierra de las Nieves.....	16
Figura 3: Parque Natural de Sierra de Grazalema.....	17
Figura 4: Paraje Natural de Sierra Bermeja.....	18
Figura 5 : Fases de un proceso EMC en un entorno SIG. Fuente: elaboración propia a partir de Malczewski, 1999 y Gómez Barredo 2006.	22
Figura 6 : Clasificación de técnicas de EMC. Fuente : Gómez Barredo, 2005.	25
Figura 7 : Definición del modelo de adecuación a pendientes mediante funciones trapezoidales.....	28
Figura 8: Fases de un proceso de asignación y superposición borrosa en un entorno SIG. Fuente: elaboración propia a partir de Malczewski, 1999 y Gómez Barredo 2006.....	29
Figura 9: Conjunto de herramientas disponibles para superposición de rásteres en ArcGis 10.	30
Figura 10: Herramienta <i>Fuzzy Membership</i> en ArcGis 10.	31
Figura 11: Herramienta <i>Fuzzy Overlay</i> en ArcGis 10.	31
Figura 12: Modelo de análisis de distribución potencial de <i>Abies pinsapo</i> mediante superposición de capas booleanas.	43
Figura 13: Mapa de distribución potencial derivado del análisis con capas booleanas.	43
Figura 14: Modelo de análisis de distribución de <i>A. pinsapo</i>	48
Figura 15: Mapa de distribución potencial derivado del análisis de comparación por pares y suma lineal ponderada.....	48
Figura 16: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa a la precipitación anual acumulada.	49
Figura 17: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa a la precipitación del mes más seco.	50
Figura 18:Asignación de función de pertenencia mediante función Gaussiana difusa a la altitud.	50
Figura 19: Proceso de asignación de función de pertenencia a la orientación.....	51

Figura 20: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa al CTI.....	52
Figura 21: Modelo de análisis para la obtención de zonas más aptas para <i>Abies pinsapo</i> mediante lógica borrosa.	53
Figura 22: Modelo de análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.....	54
Figura 23: Mapa de distribución potencial derivado del análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.	54
Figura 24: Superficie potencial ocupada de <i>A. pinsapo</i> (%) respecto al área potencial para cada localización especificada para cada métodos de cálculo (Análisis Booleano, Suma Lineal Ponderada-SLP- y Lógica Borrosa –LB-).....	56
Figura 25: porcentaje del hábitat potencial de <i>A.pinsapo</i> incluido en espacios de la Red Natura 2000 teniendo en cuenta los diferentes métodos de cálculo (Análisis Booleano, Suma Lineal Ponderada-SLP- y Lógica Borrosa –LB-).....	57
Figura 26: Ficha resumen de la distribución potencial de <i>Abies pinsapo</i> en el Parque Natural de Sierra de Grazalema.....	58
Figura 26: Ficha resumen de la distribución potencial de <i>Abies pinsapo</i> en el Parque Natural de Sierra de las Nieves	59
Figura 26: Ficha resumen de la distribución potencial de <i>Abies pinsapo</i> en el Parque Natural de Sierra Bermeja.....	60

Lista de tablas

Tabla 1: cobertura de <i>Abies pinsapo</i> en las provincias de Cádiz y Málaga (Sierra de Grazalema, Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja).....	34
Tabla 2: Matriz de correlación entre variables; 1= Precipitación anual acumulada, 2=Orientación, 3= Altitud, 4= Compound Topographic Index, 5=Temperatura máxima del mes más cálido, 6=Precipitación estival mínima.	40
Tabla 3: Restricciones integradas en el sistema multicriterio y su superficie (ha)	41
Tabla 4: criterios y límites utilizados en el análisis booleano de distribución potencial de pinsapo	42
Tabla 5: Matriz de comparación de pares para asignar el peso de cada clase en el criterio precipitación anual acumulada : I . De 350 a 600 mm, II .De 600 a 800 mm, III. De 800 a 1000 mm, IV. De 1000 a 1500 mm, V. Más de 1500 mm.....	44
Tabla 6: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de precipitación del mes más seco: I. Menos de 1,17 mm, II. De 1,17 a 2 mm, III. De 2 a 4 mm, IV. De 4 a 7 mm, V. Más de 7 mm.	45
Tabla 7: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de altitud. I. Menos de 500 m, II. Entre 500 y 800 m, III. Entre 800 y 1000 m, IV. Entre 1000 y 1600 m, V. Más de 1600 m.....	45
Tabla 8: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de orientación. I. Llano (-1) o entre 157'5º y 202'5º (S) , II. Entre 112,5º y 157'5º o entre 202'5º y 247'5º (SE)-(SW) , III. Entre 67'5 y 112'5 o entre 247'5 y 292'5 (E) - (W), IV. Entre 22'5 y 67'5 o entre 292'5 y 337'5 (NE) – (NW), V. Entre 0 y 22'5 o entre 337,5 y 360 (N)	46
Tabla 9: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de CTI. I. De -12 a 2, II. De 2 a 4, III. De 4 a 6, IV. De 6 a 8, V. Más de 8.....	46
Tabla 10: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada variable/criterio en el proceso de EMC . I. Precipitación anual acumulada (mm) , II. Altitud (m) , III. Orientación (grados) , IV. Precipitación mínima (mm) , V. Compound Topographic Index	47
Tabla 11: resultados globales de superficie (ha) por nivel de adecuación para el desarrollo de masas de <i>Abies pinsapo</i> obtenido mediante Suma Lineal Ponderada.....	47

Tabla 12: Resultados totales para la distribución potencial de <i>A. pinsapo</i> por cada uno de los métodos considerados.....	55
Tabla 13: Superficie potencial y superficie ocupada de <i>A.pinsapo</i> en los Parques Naturales de Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves y en el Paraje Natural de Sierra Bermeja.....	56
Tabla 14: superficie potencial protegida y fuera de protección (ha) de <i>A.pinsapo</i> en las provincias de Cádiz y Málaga.	57

1-Introducción

Los cambios drásticos en temperaturas y precipitaciones así como el abandono de los usos tradicionales del suelo han afectado a muchas especies que han visto reducida su distribución y cuyo pronóstico de supervivencia a largo plazo es muy bajo.

Una de las especies más emblemáticas de la península muy afectada por estos cambios es el *Abies pinsapo* que ve su distribución restringida a sólo tres zonas del Sur peninsular con apenas 2000 ha de extensión.

El objetivo de este trabajo consiste en explorar varios métodos para el cálculo del área potencial de *Abies pinsapo* como una herramienta informativa para la toma de decisiones en la conservación de la misma. Con esta intención los datos disponibles a cerca de la especie se han integrado en un Sistema de Información Geográfica y han sido tratados mediante diferentes técnicas multicriterio para ofrecer resultados aplicables en la gestión medioambiental de la zona.

1. 1.- El *Abies pinsapo* y su hábitat

El género *Abies* Miller, perteneciente a la familia Pinaceae, está compuesto por más de 50 especies distribuidas en todo el Hemisferio Norte y repartidas entre los cuatro continentes (Arista et al., 1997). Dentro de éste género podemos distinguir un grupo de 10 especies de abetos que se extienden por las montañas circunmediterráneas (Arista et al., 1997) entre las que se encuentra el *Abies pinsapo*.

El pinsapo, descrito en la primera mitad del S. XIX por el botánico suizo Edmond Boissier es uno de los endemismos vegetales más singulares de la Península Ibérica, considerada una especie relictiva. Forma un ecosistema, el pinsapar, excepcional tanto por su escasa extensión como por ser la única manifestación de abetos que ha sido capaz de sobrevivir en un ambiente mediterráneo dentro de la península (Linares, Carreira, 2006).

Su distribución es consecuencia de su aislamiento biogeográfico en zonas en las que las características ecológicas son muy parecidas a las que pudieron existir en el pasado, lo cual le proporciona un aislamiento genético y evolución independiente de la de otros abetos circunmediterráneos.

Los ejemplares adultos de pinsapo pueden llegar a medir hasta 30 metros de altitud y desarrollar troncos de hasta 1 metro de diámetro. Muestran un característico porte piramidal y corteza cenicienta con ramas horizontales a menudo triverticiladas.

Como en el resto de especies de abeto las hojas son aciculares, rígidas y de unos 8 a 15 centímetros de longitud (más pequeñas que el resto de especies del género), se colocan en una típica disposición helicoidal sobre las ramas.

Comienza a florecer después de 25 a 35 años de desarrollo (Arista et al., 2007). La dispersión del polen es anemófila. Se piensa que el vuelo del polen del pinsapo es limitado, debido principalmente al su gran tamaño y a la humedad del ambiente (Arista et al., 2007).

Uno de los factores más limitantes para la expansión de la especie son sus necesidades hídricas. El pinsapo es capaz de sobrevivir exclusivamente en regiones de clima mediterráneo húmedo e hiperhúmedo con precipitaciones mayores de 950 mm anuales, llegando a ocupar zonas de hasta 3000 mm anuales como excepcionalmente se registran en la Sierra de Grazalema. (Arista et al., 1997; Linares, Carreira, 2006).

Sin embargo, es capaz de soportar los periodos estivales más secos y cálidos en los meses de julio a agosto refugiándose en laderas de elevada pendiente orientadas al Norte debido a su carácter helioxerófilo que le permite adaptarse a las fluctuaciones climáticas propias del clima mediterráneo. Esta especie de abeto necesita orientaciones de umbría a una altitud elevada de entre 1000 a 1800 metros sobre el nivel del mar donde las temperaturas no son tan extremas y el efecto del estiaje se ve amortiguado. (Arista et al., 1997; Cerrillo et al., 2006; Linares, Carreira, 2006;).

Para el pinsapar de Yunquera se describieron curvas de distribución altitudinal de abundancias de tipo normal, cuyo máximo se encontraba aproximadamente a 1300 metros (Juan Carlos

Linares, Viñegla, & Carreira, 2003) presentando claras diferencias a lo largo del gradiente altitudinal.

Así, aproximadamente entre los 1200 y 1700 metros el pinsapo forma bosques puros, con escaso sotobosque. En su límite altitudinal inferior, aparece entremezclado con *Quercus rotundifolia*, *Quercus faginea*, *Quercus suber* o *Pinus halepensis*. En el límite superior podemos encontrar especies típicas de alta montaña como *Juniperus communis* y *Juniperus sabina* (Linares, Carreira, 2006).

En cuanto a las preferencias edáficas del *Abies pinsapo*, parece que la especie no está ligada a un tipo de suelo concreto; aunque es algo más frecuente en calizas, como ocurre en las formaciones que se conservan en las localidades de Ronda y Yunquera. También es capaz de crecer sobre otros tipos de sustrato, como peridotitas en el caso de la zona de Redes de Genalguacil y la Sierra de Tolox o sobre gneis y micacitas también en Yunquera. (Arista et al., 1997; Cerrillo et al., 2006).

A día de hoy los pinsapares se encuentran protegidos por la Ley 2/89 de 18 de Julio de 1989 en la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales de Andalucía, creándose las figuras del Parque Natural de Sierra de Grazalema (1984) y Sierra de las Nieves (1989) y el Paraje Natural de Los Reales de Sierra Bermeja (1989).

En el ámbito europeo, los pinsapares han sido incluidos en la Directiva 92/43 de conservación de hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.

Como especie, el pinsapo se encuentra protegido por el Decreto 104/94 que establece el Catálogo Andaluz de Especies de la Flora Silvestre Amenazadas, catalogada “en peligro de extinción” (Blanca et al., 2000)

La distribución actual del *Abies pinsapo* es muy restringida, formando tres masas importantes ubicadas entre las provincias de Cádiz y Málaga. En la provincia de Málaga, dentro de las Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja y en la provincia de Cádiz en la Sierra de Grazalema

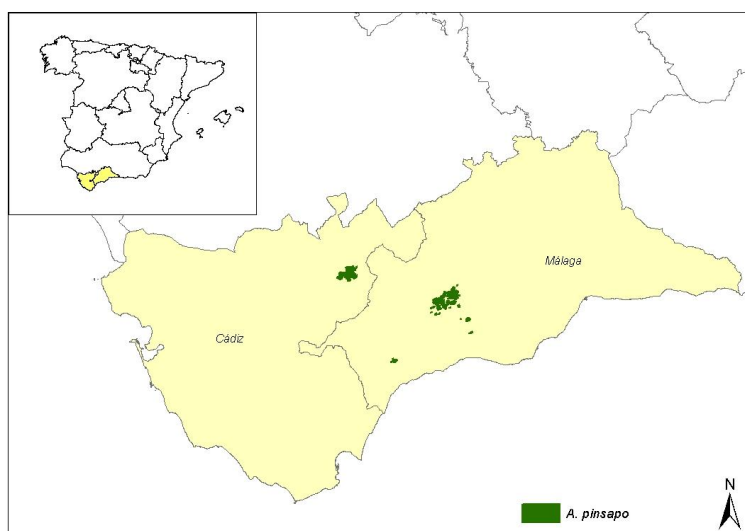


Figura 1: Distribución de *Abies pinsapo* en la Península

1.1.1 Parque Natural de Sierra de las Nieves

En la zona occidental de la provincia de Málaga, comprende los términos de Ronda, El Burgo, Tolox, Yunquera y Parauta.

Aquí es donde se encuentran las mayores poblaciones de pinsapo, en un área aproximadamente de 2000 hectáreas. Esta sierra es la parte más elevada de la Serranía de Ronda, formada por materiales calizos y margo-calizos. Como ocurre en el segundo núcleo en importancia (Grazalema) en la zona se producen fuertes karstificaciones originadas por las fuertes lluvias .

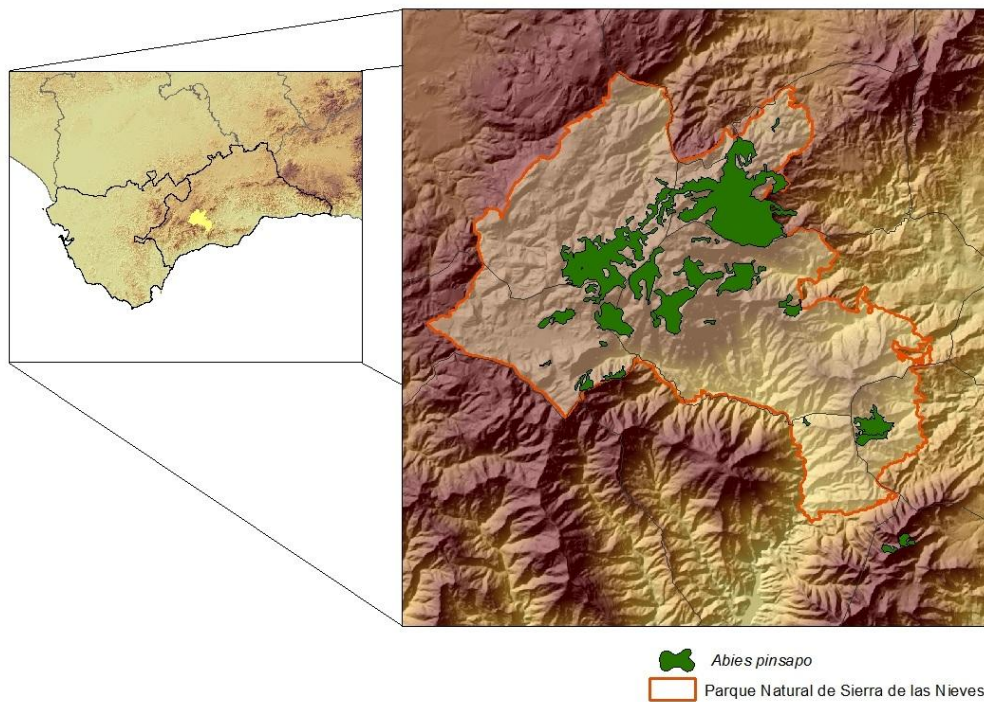


Figura 2: Parque Natural de Sierra de las Nieves

1.1.2 Parque Natural de la Sierra de Grazalema

Se extiende entre las provincias de Cádiz y Málaga, limitando al norte con el río Guadalete y al sur con el término municipal de Cortes de la Frontera, al este con el río Guadiaro y al oeste con los términos de El Bosque y Ubrique.

Dentro del Parque se encuentra una formación de bosque espeso de pinsapo entre los 900 y 1400 metros de altitud en ladera norte, dentro de la Sierra del Pinar cuya extensión es de aproximadamente 300 hectáreas.

Formando pequeños grupos o individuos aislados podemos encontrarlo en los términos de los Llanos del Revés, la base del Cerro del Montón, la Camilla baja y la parte nordeste de la Sierra de Zafalgar en una zona que abarca alrededor de 26 km².

En estos terrenos los pinsapos se desarrollan sobre calizas, lo cual hace que las intensas precipitaciones que se registran produzcan procesos kársticos que resultan en el relieve abrupto que puede observarse en la zona.

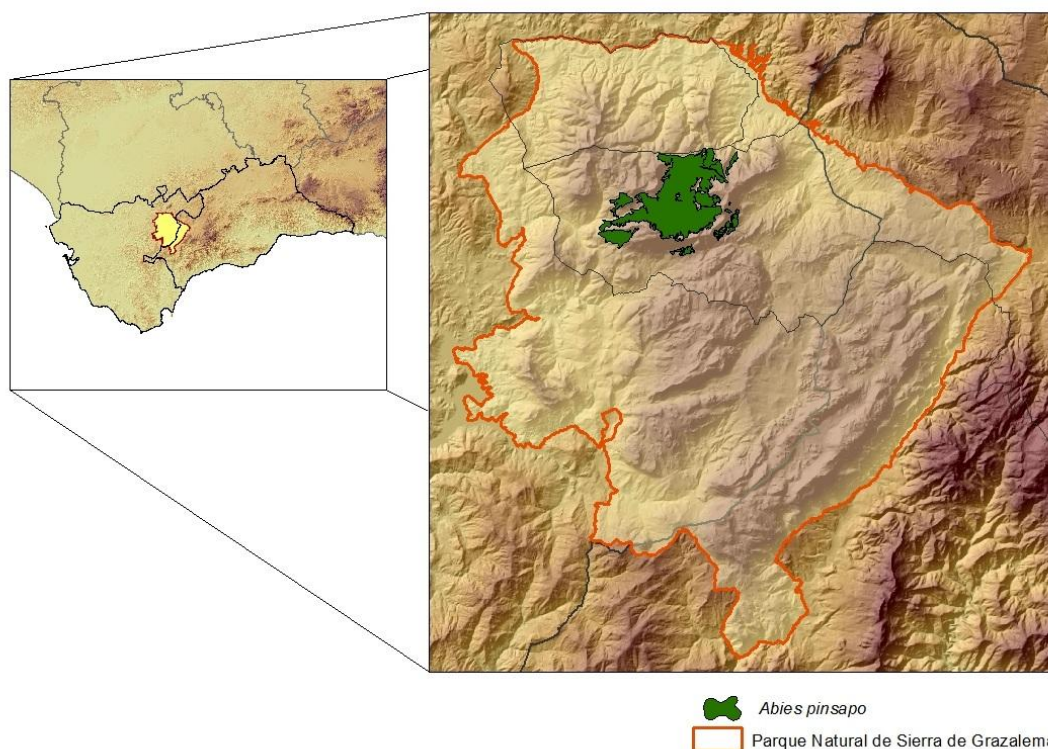


Figura 3: Parque Natural de Sierra de Grazalema

1.1.3 Paraje Natural de Sierra Bermeja

Localizado en la zona suroccidental de Málaga; comprende los términos de Casares, Estepona y Genalguacil.

En Sierra Bermeja la presencia del pinsapo se concentra en el pico de los Reales de Sierra Bermeja, junto con otros rodales de menor extensión que conforman un área aproximada de 50 hectáreas. El sustrato sobre el que se asientan es de rocas ultrabásicas (pteridotitas) a diferencia de en el resto de localizaciones.

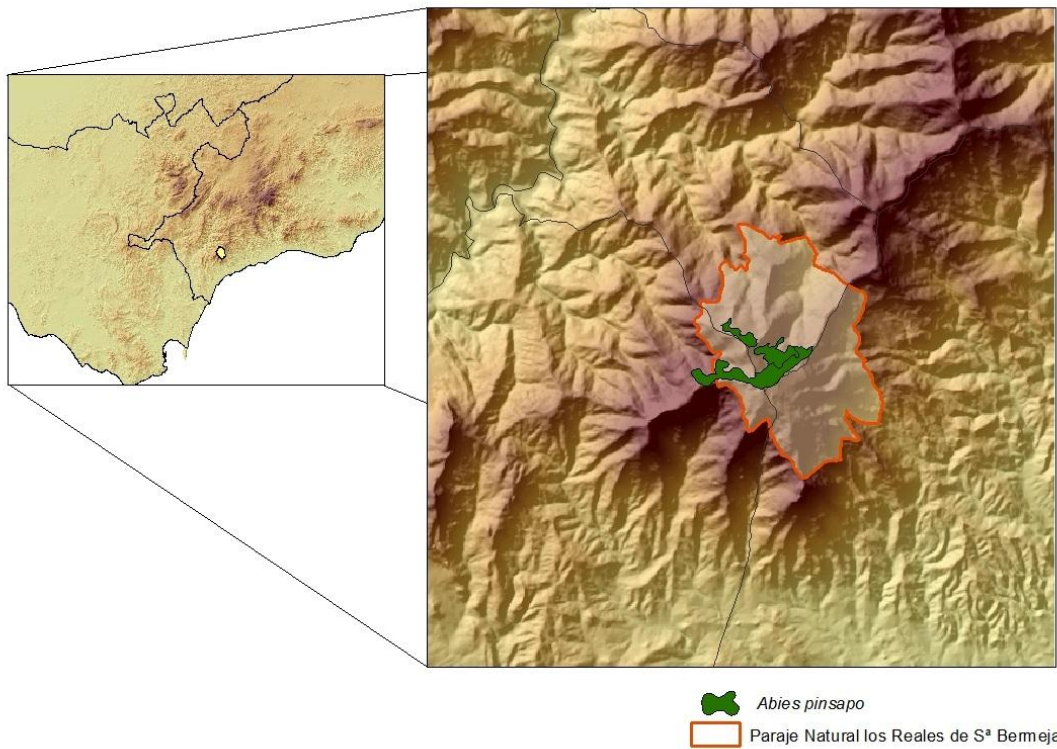


Figura 4: Paraje Natural de Sierra Bermeja

1.1.4 Estado de conservación

A pesar de gozar de protección en la actualidad, las escasas masas de pinsapo que aún se conservan se enfrentan a varios problemas que podrían poner en serio peligro su supervivencia.

Entre ellos, uno de los que más estragos ha causado en la especie en los últimos años es el ataque de agentes patógenos, bien por hongos que provocan la pudrición de las raíces (*Heterobasidium annosum* s l) o por insectos, que actúan deformando el porte y ralentizando el crecimiento de las plantas (*Dioryctria aulloi* y *Cryphallus numidicus*).

La anormal climatología de los últimos años y la prolongada sequía ha favorecido el desarrollo de plagas, especialmente de escolítidos como el *Cryphallus numidicus*, afectando a los ejemplares en exposiciones más soleadas y a menor altitud. Éste insecto es el más peligroso, ya que ataca al tronco y las ramas, excavando cámaras reniformes donde la hembra efectúa la puesta y desde la que las larvas excavan galerías radiales, lo cual provoca la muerte del árbol.

Otro de los grandes peligros para su supervivencia son los incendios. La especie no tolera el fuego (sus semillas no germinan después del paso de un incendio, ya que necesitan cierta sombra y humedad) (Linares, Carreira, 2006); éste ha sido el motivo del retroceso de sus formaciones en los últimos años en zonas como Cerro Corona (Tolox) en 1990, o Sierra del Real y Puerto Corona en 1991, Sierra Canucha en 1994, Sierra Bermeja en 1995 y Monte Prieto en 1992.

Por otra parte, los efectos en la estructura actual de los bosques provocados por el ganado y ungulados silvestres fueron importantes, al menos hasta los años 60 en que se redujo en gran medida la actividad, y aún sigue siendo un problema en los montes que no están acotados.

Pero sin duda alguna los factores que han provocado el mayor retroceso dentro de las poblaciones de pinsapo son los componentes del cambio global, es decir, los incrementos de temperaturas medias anuales y el aumento de la variabilidad interanual de las precipitaciones, junto con los cambios de usos en el territorio (al parecer, el abandono de los usos tradicionales y una protección estricta han densificado en exceso y homogeneizado estructuralmente las masas).

Se ha comprobado a partir del análisis de ortofotografías de la zona para los años 1957, 1991, 1998 y 2001 que en la última década se produce un descenso significativo en el límite inferior de su distribución (Linares, Carreira, 2006) siendo hasta de un 20% el área basal muerta, datos que se verificaron con estudios de campo. Por otra parte también se ha comprobado una expansión natural de la especie en otros núcleos. Esta situación aparentemente paradójica puede encontrar su explicación en el hecho de que el área de ocupación actual es bastante menor que su área potencial, debido, posiblemente a la acción del hombre en este territorio.

En la actualidad, y mediante el uso de nuevas técnicas de investigación, muchas de ellas basadas en Sistemas de Información Geográfica; es posible prever la situación climática futura para una serie de años e incluso en diferentes escenarios.

Dada la incertidumbre en este tipo de datos se consideran varias alternativas (varios escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, A1 y A2, definidos por el IPCC –Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) y varios modelos climáticos globales (CGCM2 y ECHAM4) regionalizados en tres periodos (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100).

Se prevén subidas de temperaturas importantes, que serán más notables en el suroeste peninsular acompañado de descenso general de las precipitaciones más intenso en la zona septentrional de la península, lo cual afectará a especies como el *Abies pinsapo*, que ya ven notablemente restringida su área de distribución y son sensibles a los cambios en las temperaturas máximas y descensos de precipitaciones. (Felicísimo et al. , 2011).

Es evidente la situación crítica del pinsapo, sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, la especie ha experimentado una expansión en algunos de sus núcleos en las últimas décadas, lo cual sugiere que los efectos negativos que han ido ocasionando su deterioro se han venido mitigando gradualmente en los últimos años, hecho que le ha beneficiado . El incremento progresivo de las medidas de protección y conservación ha sido decisivo para esta mejora.

Mediante Acuerdo del 18 de enero de 2011 se aprueban los Planes de Recuperación y Conservación de especies silvestres y hábitats protegidos, dentro de los cuales se especifica el del pinsapo, con objeto de eliminar las amenazas que le afectan y poder alcanzar un grado de conservación adecuado que permita a la especie ser descatalogada como “ en peligro de extinción” .

Una de las medidas que se proponen en dicho Acuerdo es la mejora y mantenimiento del hábitat en zonas de presencia actual de la especie, así como aquellas potenciales de ser ocupadas, apartado sobre el que profundiza el presente trabajo.

Otras actuaciones van encaminadas hacia la reducción de factores de amenaza que afectan a la especie, aumento del conocimiento y herramientas para la gestión o establecimiento de mecanismos que fomenten la implicación de todos los sectores de la sociedad en la conservación del pinsapo.

1.2 Métodos multicriterio (EMC)

La Evaluación MultiCriterio, en adelante EMC, puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Barredo, Gómez , 2005).

Las técnicas multicriterio nos proveen de herramientas que permiten el análisis de las propiedades entre las alternativas de selección que se proponen , siendo capaces de obtener un análisis equilibrado de todos los factores asociados a un problema de planificación, ya que permite la consideración de efectos intangibles como pueden ser las de carácter ambiental que nos ocupan.

Éstas técnicas se basan en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser enumeradas y catalogadas previamente.

En nuestro caso el uso de EMC nos permitiría obtener mapas que expresaran el grado de aptitud de ciertos territorios para sostener poblaciones de pinsapo, obteniendo así su área potencial.

Las técnicas EMC están encuadradas dentro de la teoría de la decisión, la cual tiene varios enfoques que tratan de interpretar cómo debe comportarse el centro decisor. La dirección positiva (descriptiva) intenta explicar cómo son los centros decisores, mientras que la normativa (prescriptiva) plantea la cuestión de cómo deben comportarse los centros decisores.

Ésta dirección prescriptiva puede basarse en evaluaciones objetivas o subjetivas (con aproximaciones como cantidades, ponderaciones, limitantes que ayudan al centro decisor a ordenar sus ideas respecto al problema de planificación). Dentro de las evaluaciones subjetivas se incluyen las técnicas multi-atributo, la programación por metas o la programación lineal. Las aplicaciones con Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el ámbito de la decisión se enmarcan dentro de esta categoría (Barredo, Gómez, 2005).

Una correcta aplicación de un método EMC en un SIG ha de seguir unas pautas que se describen en la figura 5.

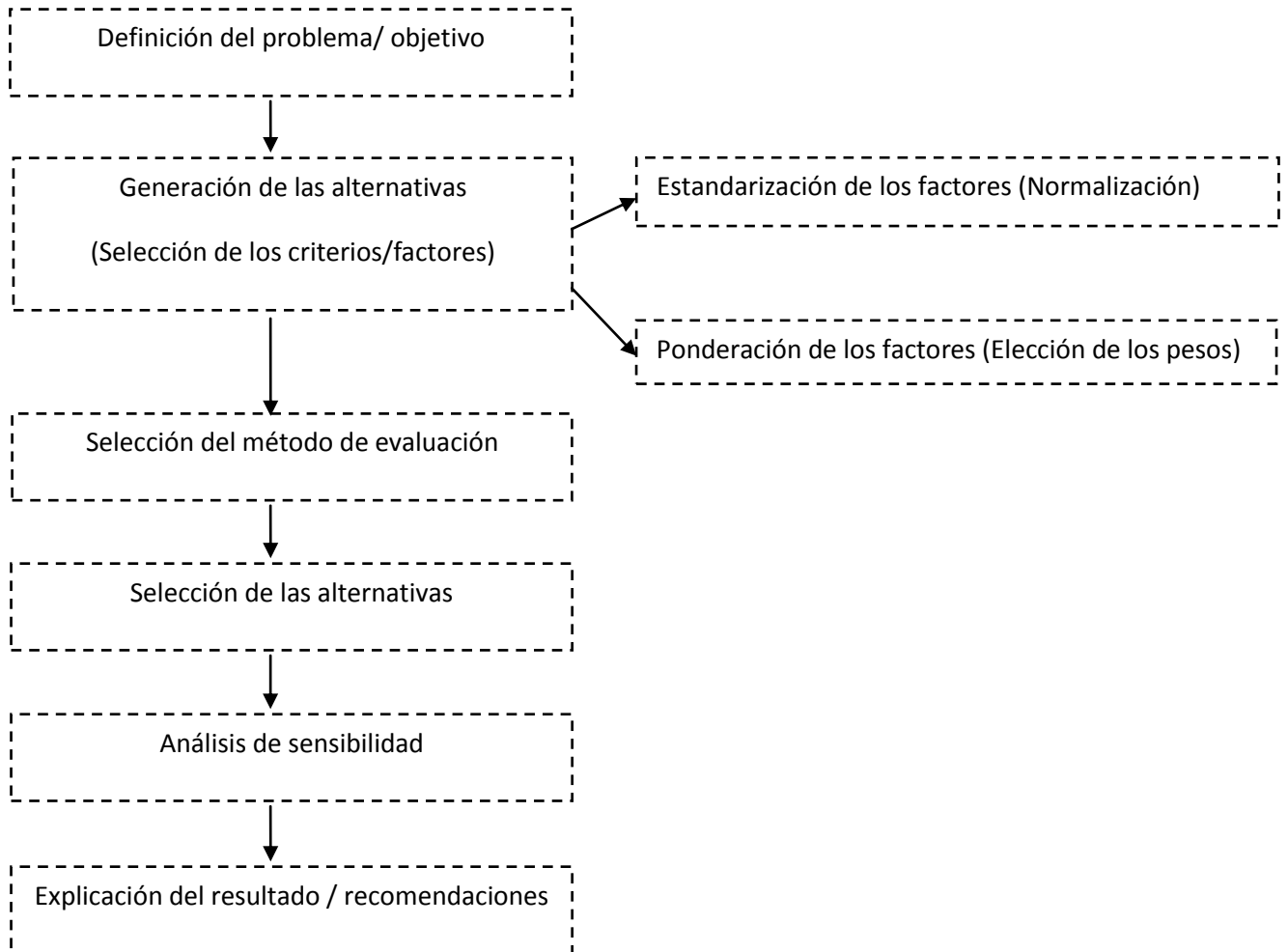


Figura 5 : Fases de un proceso EMC en un entorno SIG. Fuente: elaboración propia a partir de Malczewski, 1999 y Gómez Barredo 2006.

Una vez planteado cual es el objetivo para el cual crearemos el EMC, tendremos que determinar qué criterios (variables) nos serán útiles para llevar a cabo el análisis y obtener las diferentes *alternativas* (soluciones posibles al problema) . Podemos definir los *criterios* como los distintos aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones. Sobre este tema se profundizará más tarde en el apartado “Selección de variables”.

Los criterios pueden ser a su vez *restricciones* , aspectos de la realidad que determinan qué alternativas son válidas o aceptables y cuáles no como solución al problema, siempre

como capas binarias, o *factores* en sí, atributos de la variable que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema (cuantitativos u ordinales).

A tener en cuenta en la decisión de las variables (criterios) integradas en el modelo es que las mismas sean completas (cubren todos los aspectos del problema) operacionales (significativas) fáciles de descomponer en partes más pequeñas y no redundantes, se debería aplicar un coeficiente de correlación entre cada par de atributos y mínimos, es decir usar el menor número de variables posible. (Malczewski, 1999).

El análisis multicriterio requiere que los valores contenidos en los diversos mapas de criterios sean transformados en unidades comparables. Según el procedimiento que utilicemos para hacerlo obtendremos mapas determinísticos, probabilísticos o de adecuación difusa.

Los mapas determinísticos asignan un valor a cada objeto (polígono, píxel, ubicación) en la capa. Esta normalización puede llevarse a cabo mediante un ajuste lineal en el cual se reescalen los valores originales entre unos límites mínimo y máximo. La forma más simple de hacer esta transformación es dividir cada valor original entre el valor máximo para ese criterio;

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j^{\max}}$$

ó

$$x'_{ij} = 1 - \frac{X_{ij}}{x_j^{\max}}$$

Donde X'_{ij} es el valor estandarizado para el objeto i y la clase j , X_{ij} es el valor original y X_j^{\max} el valor máximo para la clase j . El valor estandarizado varía entre 0 y 1. La ventaja que proporciona este método es que el orden relativo de magnitud para los valores estandarizados se mantiene, es decir si los valores originales son 3, 15 y 26 y obtenemos los valores normalizados 0,115, 0,577 y 1.0 respectivamente, entonces $3/15 = 0.115$, $3/26 = 0.115/1.0$ y $15/26 = 0.577/1.0$. (Malczewski, 1999).

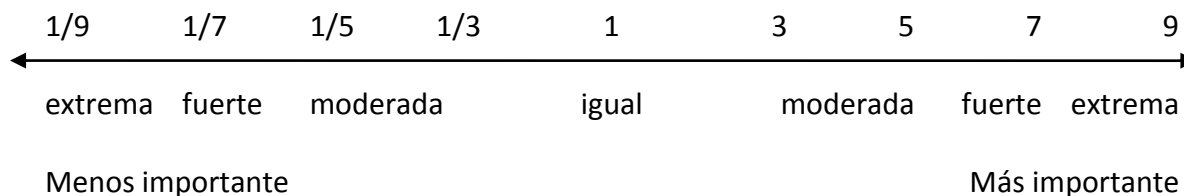
También pueden usarse funciones de pertenencia borrosa para generar mapas conmensurables de cada criterio, aspecto que se explica más adelante.

Seguidamente tendremos que establecer la importancia de los distintos factores para acoger o ser afectados por una determinada actuación, en nuestro caso estableceremos el peso de cada una de las variables para obtener las zonas aptas para el crecimiento de *Abies pinsapo*.

Hay varios métodos que permiten la valoración de la importancia de los factores, entre ellos destacan el método Delphi, en el cual los pesos se obtienen a través de la consulta a expertos o el método de las Jerarquías Analíticas (MJA) o comparación por pares.

El MJA fue desarrollado por T.L. Saaty a finales de los 70'. En él se establece una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de variables a ponderar, así creamos una matriz de comparación entre pares de factores y procedemos a comparar la importancia de uno de ellos sobre los demás (a_{ij}). Posteriormente se determina el eigenvector principal, el cual establece los pesos (w_j) y el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (consistency ratio – c.r.-) que se establece a partir del cociente entre el valor del índice de consistencia (c. i) y el índice aleatorio (r. i.). Los valores de c.r. mayores o iguales que 0,10 deben ser revisados ya que no son lo suficientemente consistentes para establecer los pesos. (Gómez, Barredo, 2005)

La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor (a_{ij}) es de tipo continuo y va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9.



Una vez definidos los pesos para cada variable, tendremos que determinar la técnica EMC que mejor se adapte a nuestro objetivo, datos y medios. Estas técnicas pueden clasificarse en *compensatorias* (requieren que el centro decisor especifique los pesos de los criterios como valores cardinales o funciones de prioridad) y *no compensatorias* (requieren una jerarquización ordinal de los criterios).

Las compensatorias se basan en la suposición de que el valor alto de una alternativa en un determinado criterio se puede ver compensado por un valor bajo de la misma alternativa en otro criterio, no siendo así en las no compensatorias.

A continuación se muestra un cuadro donde se clasifican las principales técnicas de EMC ordenadas según la anterior característica.

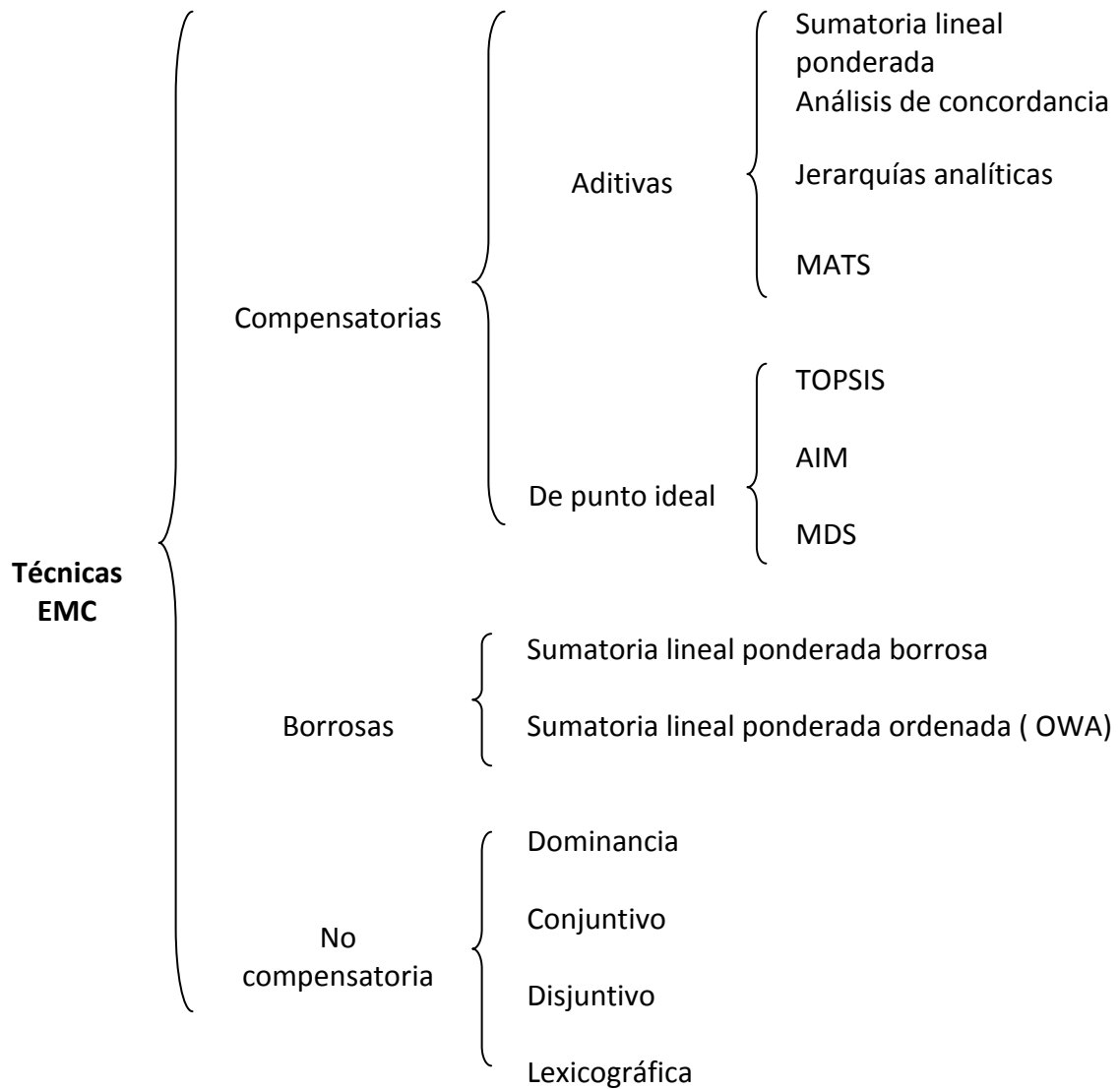


Figura 6 : Clasificación de técnicas de EMC. Fuente : Gómez Barredo, 2005.

Las técnicas de EMC compensatorias se subdividen en aditivas (el valor de la alternativa es producto del peso del criterio por la puntuación del criterio) como la sumatoria lineal ponderada, el análisis de concordancia las jerarquías analíticas o el sistema de propiedades multi-atributo (MATS).

El otro grupo de técnicas compensatorias es el basado en la aproximación al punto ideal, es decir, la alternativa que se considera ideal se dispone en un espacio n-dimensional, siendo sus coordenadas el valor más alto en cada uno de los criterios, así es posible calcular la distancia de cada alternativa a dicho punto ideal, siendo las más cercanas las más aptas, dentro de esta categoría se encuentran las técnicas TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), AIM (*Aspiration-level Interactive Method*), MDS (*Multi-Dimensional Scaling*) y el propio Análisis de Punto Ideal.

Dentro de las técnicas compensatorias aditivas destacan la Sumatoria Lineal Ponderada (SLP) . Es uno de los métodos más empleados por su sencillez en la que el grado de adecuación de halla sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

donde:

r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i

w_j es el peso del criterio j

v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

También dentro de esta categoría está el método de las jerarquías analíticas, que supone que el problema de decisión ha de ser descompuesto en una jerarquía que capte sus elementos esenciales (que hemos explicado antes como método para asignar el peso a cada uno de los criterios) .

El Análisis al Punto Ideal considera los criterios como ejes de un sistema de referencia (X, Y) . Este punto resulta inalcanzable para las alternativas . Si normalizamos el valor de las alternativas entre 0 y 1 entonces las coordenadas del punto ideal serían siempre 1.

La ventaja de este método es que en éste no se hacen operaciones entre los valores de las alternativas, no hay efecto de compensación, por ejemplo otorgando valores ambientales altos para un lugar aunque sólo tenga puntuación alta en uno de los criterios .Como se explicaba antes, la mejor alternativa sería la que presenta una menor distancia al punto ideal.

Otro de los métodos fundamentados en el análisis al punto ideal es el método del orden de las preferencias por similitud a la solución ideal (TOPSIS) , que basa su funcionamiento en el cálculo de las distancias al punto ideal y anti-ideal, lo cual permitiría trabajar con ambos resultados.

Las técnicas no compensatorias se basan en la relevancia de uno de los criterios frente a los demás y dentro de esta categoría están las técnicas de dominancia (eliminación total de una de las alternativas) , conjuntivo, disjuntivo o lexicográfico.

El último grupo de técnicas son las que se han denominado borrosas, ya que están basadas en el concepto de la pertenencia al conjunto borroso que representa a una clase de elementos u objetos sin límites bien definidos entre los objetos que pertenecen a esa clase y los que no.

Para ello primero haremos una introducción al concepto de lógica borrosa para después explicar las herramientas de que disponemos en el entorno SIG para implementarla.

1.3 Lógica Borrosa

La teoría de los conjuntos borrosos fue desarrollada por L.Zadeh en los 60', se considera una generalización del álgebra booleana, siendo útil para procesar información con zonas de transición gradual, como pueden ser las clasificaciones de elementos .

La lógica borrosa describe la posibilidad de que una localización sea miembro de un conjunto determinado, no estando ligado a una función de probabilidad y pudiendo esta posibilidad estar basada en el conocimiento subjetivo de un experto .

El hecho de que el conjunto borroso pueda expresar la transición gradual desde la pertenencia o no a un conjunto (clase) hace de esta técnica una potente herramienta para la representación geográfica de entidades con límites imprecisos , ejecución y análisis basados en SIG, ya que es capaz de manejar la incertidumbre a cerca de los datos geográficos, reglas de decisión o representación de conceptos imprecisos (Gómez, Barredo, 2005) .

Si necesitamos describir un fenómeno, en general, tendremos que caracterizarlo en clases. En un conjunto nítido la pertenencia es binaria, es decir el fenómeno está dentro o fuera de la clase, debido a la imprecisión , las reglas ambiguas de caracterización o la ambivalencia los límites entre estas clases no siempre están claros.

Por ejemplo; si queremos analizar la pendiente de un terreno podremos comenzar definiendo tres clases : llano, desnivel medio, gran desnivel , y establecer los límites entre estas clases.

La clasificación booleana (nítida) asignaría cada terreno a uno de estos conjuntos (llano, medio o gran desnivel), por ejemplo, diremos que el terreno llano será todo aquel que tenga 10% de pendiente o menos, un terreno de gran desnivel será el que tenga más de 30% de pendiente y un terreno con desnivel medio el que tenga una pendiente de entre 10 y 30 % . Un terreno que tiene una pendiente de 30% será clasificado como de gran desnivel y un terreno con 29% de pendiente sería un terreno de desnivel medio con sólo 1% de diferencia . Si el terreno tuviese 12% de pendiente seguiría colocándose en la clase de desnivel medio a pesar de que la diferencia entre ambas pendientes es grande.

La representación borrosa, sin embargo, asigna un grado de pertenencia en el intervalo [0, 1] de cada terreno a cada uno de los conjuntos borrosos (llano, medio o gran desnivel), pudiendo tener cierto grado de pertenencia a varios de ellos, como se muestra en la Fig. 7. Si quisiéramos representar de manera más adecuada estas relaciones podríamos agregar más clases (llano, desnivel medio –bajo , desnivel medio, desnivel medio-alto y gran desnivel). A pesar de que añadamos más clases siempre seguiríamos obteniendo una generalización de la relación entre las pendientes del territorio. Como puede observarse la definición de los límites de las clases es subjetiva y no del todo precisa, hecho que se agrava si se tienen en cuenta los errores de medición. Si en este caso el procedimiento para obtener la pendiente del terreno tiene una precisión de más menos un 1%, la imprecisión puede cambiar la clase a la que se asignó el fenómeno.

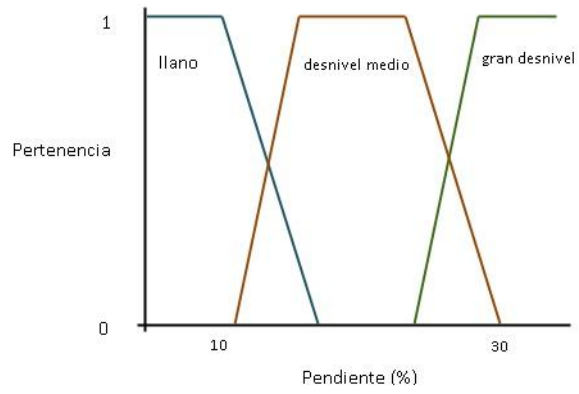


Figura 7 : Definición del modelo de adecuación a pendientes mediante funciones trapezoidales.

Debido a que se basa en un concepto de posibilidad el proceso de integración en un SIG es diferente en algunos aspectos, como vemos a continuación;

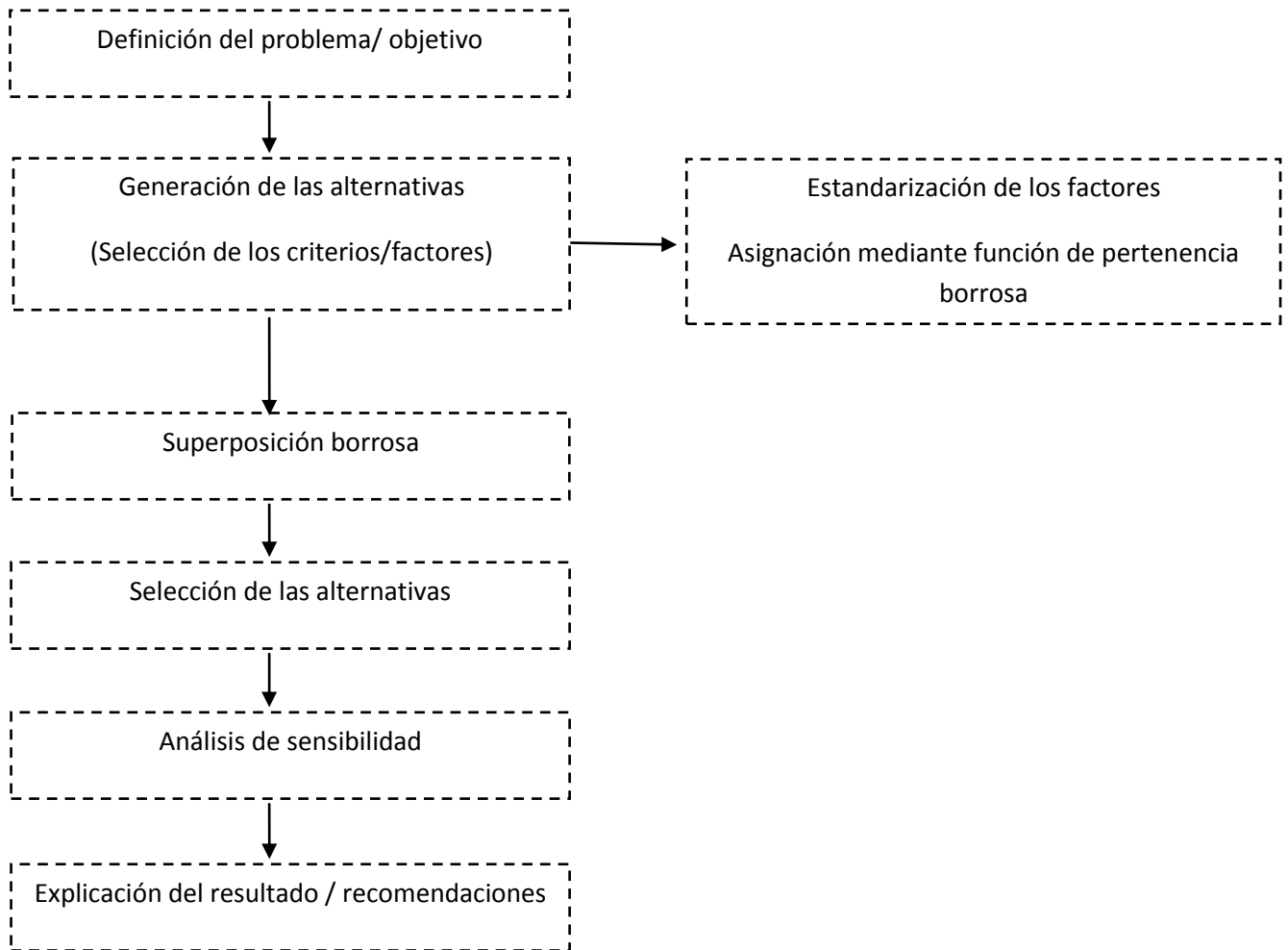


Figura 8: Fases de un proceso de asignación y superposición borrosa en un entorno SIG. Fuente: elaboración propia a partir de Malczewski, 1999 y Gómez Barredo 2006.

Como en el caso de la aplicación de un sistema EMC en un SIG, la asignación y superposición borrosa requiere la definición previa del modelo en términos lingüísticos.

El siguiente paso sería lo que se denomina *fusificación*, o conversión de los términos lingüísticos en conjuntos borrosos asignando a cada criterio (variable) una función de pertenencia que define el grado de pertenencia de cada elemento del universo (por ejemplo, de cada terreno) a cada conjunto borroso.

Para definir esta pertenencia disponemos de varios modelos ; la importación semántica o *SI*, el modelo de relación de similitud o modelos experimentales como las redes neuronales o la clasificación continua (basada en el uso del algoritmo *k-means*). El más extendido y flexible es el de importación semántica o *SI* que se basa en el establecimiento de los puntos críticos para definir la función de pertenencia. (Gómez, Barredo, 2005).

Algunas de las funciones de pertenencia más usadas son las trapezoidales y las triangulares, aunque existen otros tipos como la sigmoide (*S-Shaped*) , en la que debemos especificar la posición de los puntos de inflexión en el eje de las X, los cuales nos permiten generar la función de pertenencia, o las funciones en forma de J (*J- Shaped*) menos utilizada que la Sigmoide.

La elección de la función de pertenencia borrosa depende del fenómeno que intentemos modelar, tendremos que valorar qué función captura mejor la transformación de los datos. Éste es un paso importante en la aplicación.

1.3.1. Herramientas disponibles en ArcGis 10 para implementación de lógica borrosa

En el módulo *Spatyal Analyst* de ArcGIS 10.0 podemos encontrar diferentes herramientas relacionadas con la implementación de la lógica borrosa para la superposición de rásteres (Figura 9).

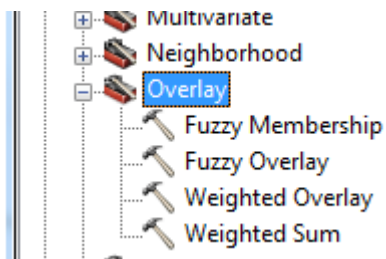


Figura 9: Conjunto de herramientas disponibles para superposición de rásteres en ArcGis 10.

Entre ellas está la herramienta *Fuzzy Membership*,(Figura 10) que permite asignar a un raster de una función de pertenencia borrosa que el usuario define mediante el tipo de función y una serie de parámetros de entrada. Ésta herramienta dispone de un amplio conjunto de funciones para realizar la asignación. (Anexo A).

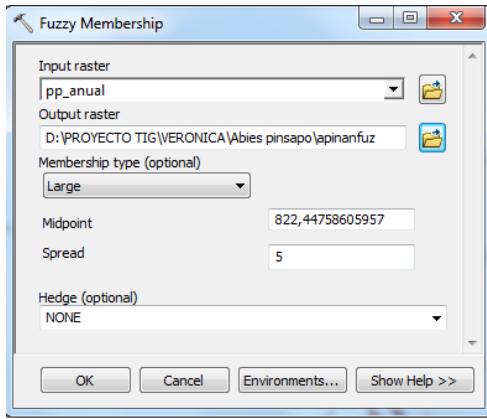


Figura 10: Herramienta *Fuzzy Membership* en ArcGis 10.

Una vez realizada la asignación podemos proceder a agregar las capas. Basada en la teoría de conjuntos, se lleva a cabo una superposición borrosa, la cual cuantifica la relación de pertenencia del fenómeno a conjuntos específicos, es decir, explora la posibilidad de que una celda pertenezca a cada conjunto definido por los diversos criterios.

Para ello se disponen de varios operadores para realizar la combinación mediante la herramienta *Fuzzy Overlay* (Figura 11)que se describen en el cuadro que sigue;

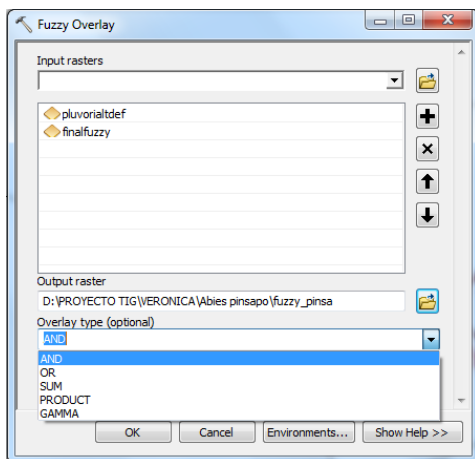


Figura 11: Herramienta *Fuzzy Overlay* en ArcGis 10.

OR difuso	Valor máximo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda; identifica los valores de pertenencia máximos para cualquiera de los criterios.	$\mu(x) = \max (\mu_i)$
AND difuso	Valor mínimo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando se desea identificar el mínimo denominador común para la pertenencia de todos los criterios de entrada, norma triangular que propone Lofti Zadeh para definir y generalizar la intersección de conjuntos borrosos.	$\mu(x) = \min (\mu_i)$
Producto difuso	Multiplica , para cada celda, cada uno de los valores difusos para todos los criterios de entrada. El producto resultante será menor que cualquiera de las entradas y, cuando la entrada pertenece a varios conjuntos, el valor puede ser muy bajo.	$\mu(x) = \prod_{i=1}^n \mu_i$
Suma difusa	Sumará los valores difusos de cada conjunto al que pertenece la ubicación de la celda. La suma resultante es una función de combinación lineal creciente que está basada en el número de criterios introducidos en el análisis.	$\mu(x) = \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$
Gamma	<p>Producto algebraico del Producto difuso y la Suma difusa, los cuales se elevan a la potencia de gamma.</p> <p>Si el valor gamma especificado es 1, la salida es la misma que la de la Suma difusa; si el valor gamma es 0, la salida es la misma que la de Producto difuso.</p> <p>Gamma difusa comprende el efecto creciente de Suma difusa y el efecto decreciente de Producto difuso.</p> <p>Se utiliza Gamma difusa cuando se desea obtener valores mayores que los de Or difusa y menores que los de Suma difusa.</p>	$\mu(x) = (\text{fuzzysum})^\gamma - (\text{fuzzyproduct})^\gamma$ <p>Donde γ es un parámetro especificado por el usuario.</p>

Fuente : ArcUser. Primavera 2010 y ArcGIS Desktop Help 10.0

2-.Material y métodos

2.1 Producción de la información básica

2.1.1.Obtención de la distribución actual de *Abies pinsapo*

Es necesario conocer cuál es la distribución actual de la especie. Como base cartográfica se empleó el Mapa Forestal de España (1:200.000 y 1:50000) (Ruíz de la Torre, 1990) y el Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía-2003- (1.25000).

Inicialmente se explora el área de estudio mediante el análisis de una imagen Landsat5-TM de la zona para el año 2008 que a pesar de ser antigua permite la aproximación a los terrenos susceptibles de presencia de pinsapo. Éste tipo de cobertura presenta un tono rojo vivo, sobre todo en los ejemplares más jóvenes, lo que hace que pueda confundirse con otro tipo de especies frondosas perennifolias y caducifolias. Se aplicó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para analizar las diferencias entre las especies vegetales. Para elaborar el mapa de presencia final se utilizaron mosaicos de ortofotos con la mayor resolución geométrica disponible y con fecha más reciente procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, con vuelos a escala 1:30.000 y ortofoto final con píxel de 0,5m.

Se identificaron las masas de pinsapo en las zonas ya conocidas utilizando criterios de contraste, textura y apariencia de copas y sombras. A pesar de que el pinsapo posee un característico porte cónico que permite que sea identificado con relativa facilidad, el reconocimiento de nuevas masas tiene algunas dificultades en aquellas zonas que se encuentran en situaciones escarpadas y en umbría ya que no reciben suficiente luz y aparecen demasiado oscuras en la ortofoto . Igualmente, la identificación de masas en regeneración o mixtas que no son tan visibles como las masas puras puede presentar problemas de confusión con otras especies y por consiguiente sobreestimación del área actual de distribución.

El resultado se verificó con la bibliografía más reciente disponible sobre la distribución del pinsapo junto con cartografía auxiliar (Mapa Topográfico Nacional 1.50.000) y consulta a expertos.

Para una mejor comprensión de la evolución de las masas , estructura y estado se evalúa la cobertura de *Abies pinsapo*. Se clasificaron las masas de pinsapo estimando su cobertura en tanto por ciento visualmente , según el siguiente criterio:

Tabla 1: cobertura de *Abies pinsapo* en las provincias de Cádiz y Málaga (Sierra de Grazalema, Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja).

Clase	Descripción	% Cobertura
Masa pura	Pinsapo como especie principal en buen estado de desarrollo.	70-100
Masa mixta	Bosques mixtos mezcla con <i>Quercus</i> o <i>Pinus</i>	45- 70
Masa en regeneración	Individuos de no muy avanzada edad o en grupos reducidos aislados.	< 45

El mapa resultado se muestra a continuación. En él puede observarse el tanto por ciento de cobertura en cada una de las localizaciones.

Distribución actual de "Abies pinsapo" en la Sierra de Grazalema, Nieves y Bermeja

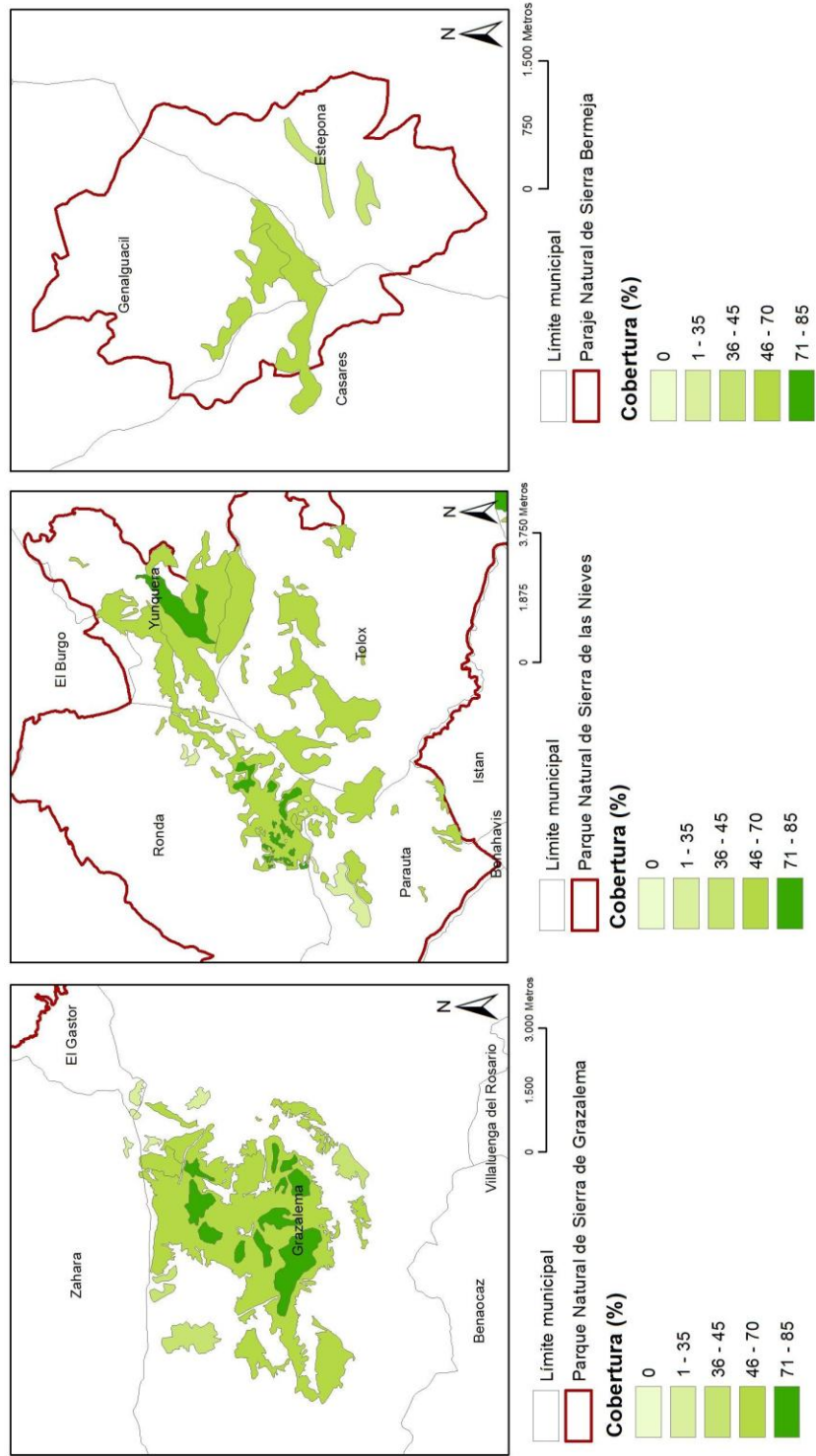


Figura 12: Distribución actual de "Abies pinsapo" y cobertura en tanto por ciento

2.1.2 Modelo Digital del Terreno

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es una “estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua” (Felicísimo, 1944) en este caso la altimetría de la zona de estudio mediante un conjunto de datos acotados refiriéndonos entonces a Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir del cual pueden derivarse otros modelos sencillos como la orientación, sombras o pendientes, o más complejos como índices (Compound Topographic Index) modelos de reflectancia o insolación.

Debido a las características de la zona, montañosa muy accidentada y a la reducida extensión de la distribución del pinsapo es recomendable tener en cuenta la resolución del MDT, ya que ésta determinará la de todo el análisis. Necesitamos un modelo que sea lo suficientemente sensible para captar la variación local del área de estudio.

Para ello se generó un modelo a partir de la altimetría – curvas de nivel y cotas con equidistancia a 10 metros- proporcionada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a partir de la cual se creó la red irregular de triángulos –TIN- que permitió elaborar el MDT en formato raster con un paso de malla de 10 metros.

2.1.3 Datos climáticos

Se intentaron varias aproximaciones para capas de precipitación anual y temperaturas mediante el análisis de estaciones con datos de precipitación anual acumulada (mm) mensuales y temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales para las provincias de Cádiz y Málaga. Para ello se probaron varios métodos de interpolación como el IDW-*Inverse Distance Weighted*- que resultó no ser aceptable para este tipo de variable, debido al bajo número de puntos muestrales y a su situación en cotas no demasiado elevadas. Para captar la variación local de la precipitación y temperatura con la altitud se hizo un análisis de regresión mediante mínimos cuadrados y se intentó un ajuste de los residuos para confeccionar la capa final de precipitación y temperaturas, sin embargo la capa final resultado no captaba la variación de la temperatura en zonas tan significativas para el estudio como la Sierra de Grazalema o Sierra de las Nieves.

Finalmente se optó por usar la malla climática de la España Peninsular (Gonzalo, 2010) que contiene datos de temperatura media mensual, temperatura media de las mínimas mensuales, temperatura media de las máximas mensuales y precipitación total mensual para el periodo comprendido entre 1951 y 1999 usando datos de aproximadamente 1350 estaciones Termopluviométricas Peninsulares e incorporando a su vez modelos fitoclimáticos.

Ésta malla sí es capaz de captar la variación local de precipitaciones y temperaturas que suponen un elemento importante en el análisis del hábitat potencial del *Abies pinsapo*.

2.2. Selección de variables

La elección de los criterios o variables a incluir en el análisis es quizás uno de los pasos más críticos en el multicriterio, dado que esta elección redundaría directamente en la calidad y utilidad del modelo obtenido.

En general la preferencia de una especie por un territorio en concreto responde a un conjunto de variables relacionadas entre sí. La disponibilidad de agua (en términos de escorrentía o pérdida, evaporación, transpiración, evapotranspiración o infiltración – parte que es asimilada por el suelo-) es un factor determinante para la supervivencia de las especies vegetales, así como temperatura, que es la medida del aporte de calor o energía al sistema. Éstas a su vez están determinadas o modificadas por factores como la fisiografía. La orografía de un territorio introduce modificaciones en la circulación de la atmósfera originando variaciones climáticas locales. Del mismo modo, la altitud modifica estas relaciones; cuando ascendemos en altitud la presión atmosférica y la temperatura disminuyen, haciendo que el déficit hídrico también se reduzca, aumentando las precipitaciones y reduciéndose la radiación.

Todas estas características conforman los pisos de vegetación.

Por otra parte factores como la pendiente influyen en la escorrentía y la orientación en el número de horas de insolación recibidas, por lo tanto a su vez en la temperatura y la evaporación que siempre serán menores en terrenos con exposición Norte.

Atendiendo a su distribución actual podríamos identificar la altitud, orientación y precipitación como variables predictoras para la presencia de *Abies pinsapo*, sin embargo éstas variables podrían no ser las más representativas o presentar autocorrelación (a menor insolación, menor evapotranspiración, mayor humedad) lo cual haría que no fueran estadísticamente significativas.

Para la evaluación del hábitat potencial del pinsapo con modelos de regresión logística se identificaron como predictores la altitud, insolación y el Compound Topographic Index (CTI); índice que representa la capacidad del suelo para retener agua (Navarro et al. 2006). Sin embargo el pinsapo ha sido objeto de estudios fitoclimáticos que consideran exclusivamente las variables climáticas como buenos parámetros para explicar su biogeografía (Fernández-Cancio et al, 2007). En estudios más recientes que emplean algoritmos predictivos como herramienta de modelización del hábitat de la especie MaxEnt¹ se identificaron las variables relacionadas con la estacionalidad del clima Mediterráneo (pluviométricas y termométricas) como las más significativas para explicar la distribución potencial de la especie, ayudándose de otras variables derivadas de la topografía como la orientación o el índice de humedad topográfico (similar al CTI) (Alba et al 2010).

¹ MaxEnt: algoritmo diseñado para calcularla distribución geográfica potencial de especies, que combina inteligencia artificial y el principio de máxima entropía (Jaynes 1957)

Para analizar con la mayor exactitud posible el hábitat potencial del *A.pinsapo* se crean capas raster con una resolución de 10 metros para variables climáticas y derivadas de la topografía a partir de la información básica de que se dispone.

Entre los datos climáticos disponibles se eligen la precipitación total anual acumulada (mm) la temperatura máxima del mes más cálido (°C) y la precipitación del mes más seco (mm) a partir de la interpolación mediante el método IDW – *Inverse Distance Weighted*- para datos puntuales procedentes de la malla climática de la España Peninsular (Gonzalo, 2010).

Como variables derivadas de la topografía se toman la altitud (obtenida directamente a partir del Modelo Digital de Elevaciones) y orientación en grados. Se calcula también el índice de humedad topográfico – *Compound Topographic Index*- que en parte simbolizará la influencia de la pendiente como capacidad del terreno para acumular agua y que se detalla a continuación.

Compound Topographic Index (CTI)

Con este índice tratamos de representar la capacidad del suelo para acumular agua (característica importante en el desarrollo del pinsapo) en un determinado punto del territorio(Felicísimo, 2003) . Es el resultado de dividir el área subsidiaria de cada punto por la pendiente en ése punto.

El índice está definido por la siguiente ecuación:

$$\ln \left[\frac{\alpha}{\tan \beta} \right]$$

Donde α representa el área subsidiaria de cada punto y β la pendiente en radianes.

El resultado es un mapa en el que los valores más bajos de CTI evidencian poca capacidad del suelo para acumular agua, con pequeñas áreas subsidiarias y pendientes escarpadas, mientras que las zonas con valores de CTI más altos representarán pendientes menos pronunciadas y mayores capacidades de retención de agua, lo cual asimilaríamos como terrenos más aptos para la supervivencia del pinsapo.

Parece lógico asumir que las variables descritas están correlacionadas entre sí, ya que están derivadas del mismo modelo de elevaciones y obviando las variaciones locales, se encuentran en una zona con características climáticas muy similares. Tener en cuenta criterios excesivamente correlacionados podría llevar a obtener resultados difíciles de interpretar.

Para analizar este fenómeno en nuestras variables utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson, que mide el grado de relación entre dos variables cuantitativas. Éste se define como:

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$$

Donde,

Cov_{ij} es la covarianza de i, j

σ_i es la desviación típica de la variable i

σ_j es la desviación típica de la variable j

El índice varía entre +1 y -1, evidenciando una relación directa entre dos capas los valores positivos y al contrario los valores negativos.

Tabla 2: Matriz de correlación entre variables; 1= Precipitación anual acumulada, 2=Orientación, 3= Altitud, 4= Compound Topographic Index, 5=Temperatura máxima del mes más cálido, 6=Precipitación estival mínima.

Variables	1	2	3	4	5	6
1	1	0,01369	0,3825	-0,00188	-0,52326	0,2473
2	0,01369	1	0,05439	-0,11557	-0,02104	-0,00037
3	0,3825	0,05439	1	-0,05384	-0,7375	0,51607
4	-0,00188	-0,11557	-0,05384	1	-0,00081	0,02798
5	-0,52326	-0,02104	-0,7375	-0,00081	1	-0,39592
6	0,2473	-0,00037	0,51607	0,02798	-0,39592	1

Aceptamos un coeficiente de Pearson de en torno 0,5 y menores para considerar que la correlación no es excesiva. Teniendo en cuenta este valor umbral, podemos ver cómo la temperatura máxima del mes más cálido (5) es la variable que presenta mayor correlación tanto con la altitud (0, 7375) como con la precipitación anual (0,5232), por lo tanto no será incluida en el análisis.

Aunque los criterios empleados, por su naturaleza, habrán descartado zonas como lagos y lagunas interiores para el recuento de zonas de máxima aptitud para el desarrollo de masas de *A.pinsapo*, creamos una serie de restricciones en forma de capas booleanas para eliminar del recuento final todas aquellas superficies que consideramos no compatibles con una posible recolonización de la especie, cuya descripción y extensión en hectáreas se muestran en la siguiente tabla ;

Tabla 3: Restricciones integradas en el sistema multicriterio y su superficie (ha)

Descripción	Área (ha)
Láminas de agua interiores	12392,25
Zonas de extracción minera	2365,40
Zonas urbanas e industriales	14407,38

3. Obtención del mapa de distribución potencial de *Abies pinsapo*

3.1. Obtención del mapa de distribución potencial de *A. pinsapo* mediante creación de capas booleanas.

Con este método realizaremos una aproximación a los terrenos más aptos mediante el uso de capas booleanas (apto- no apto), seleccionando para cada variable los rangos que conocemos como más aceptables para el desarrollo de la especie y clasificándolas como aptas. Descartaremos el resto como zonas no aptas.

Tabla 4: criterios y límites utilizados en el análisis booleano de distribución potencial de pinsapo

Criterio	Zonas aptas
Precipitación anual acumulada (mm)	Precipitación anual por encima de los 1000mm.
Precipitación del mes más seco (mm)	Precipitación del mes más seco por encima de 7 mm.
Altitud(m)	Altitudes entre 1000 y 1800 metros.
Orientación (grados)	Exposiciones Norte, umbría.
Compound Topographic Index	Valores de CTI mayores que 6 (mayor capacidad para retener agua).

3.1.1. Modelo de análisis mediante capas booleanas

A continuación se muestra el modelo para la obtención de la distribución potencial mediante capas booleanas (ver figura 13). En primer lugar se han reclasificado cada una de las capas de variables implicadas en la distribución de la especie, escogiendo como aptos sólo los intervalos definidos previamente. A continuación se calcula el mapa de distribución potencial mediante una operación de superposición con *Raster calculator* en la que se tienen en cuenta las restricciones.

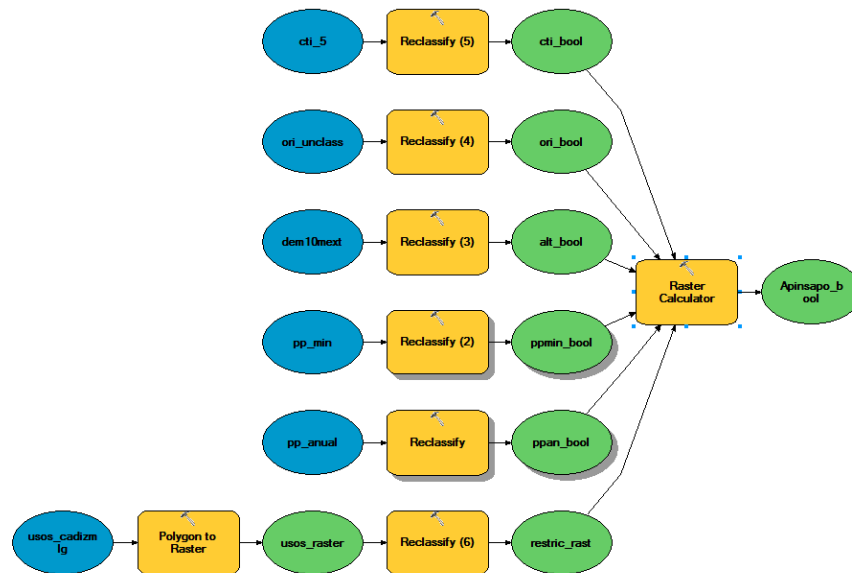


Figura 12: Modelo de análisis de distribución potencial de *Abies pinsapo* mediante superposición de capas booleanas.

El resultado del proceso es un mapa de distribución potencial de pinsapo en el que sólo se han tenido en cuenta los rangos más aptos para la supervivencia de la especie.

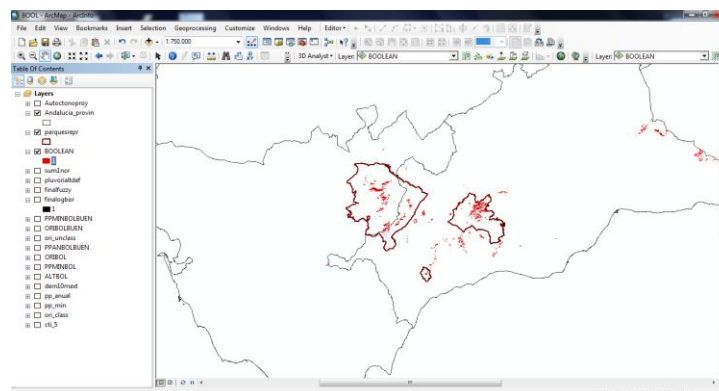


Figura 13: Mapa de distribución potencial derivado del análisis con capas booleanas.

3.2. Obtención del mapa de distribución potencial de *A. pinsapo* mediante comparación por pares Saaty y Suma Lineal Ponderada

Antes de aplicar alguna técnica multicriterio para valorar la aptitud del territorio para acoger poblaciones de pinsapo debemos hacer que los valores contenidos en los mapas de variables tengan unidades comparables.

3.2.1 Asignación de pesos mediante comparación por pares

Para determinar el valor de aptitud de cada clase dentro de cada variable utilizamos la comparación por pares elaborando la matriz entre pares de clases para cada criterio, así normalizaremos todas las variables y podrán ser integradas en el sistema multicriterio. Esta asignación de valores para las clases nos permite hacer una ponderación menos imparcial que la asignación directa de valores a cada clase mediante la extensión disponible para ArcGis (Marinoni, 2004).

Precipitación anual acumulada (mm)

Según la bibliografía ya citada el desarrollo del pinsapo es óptimo en clima mediterráneo húmedo e hiperhúmedo, entre 1000 y 1300 mm anuales, pudiendo soportar cierto encharcamiento.

Tabla 5: Matriz de comparación de pares para asignar el peso de cada clase en el criterio precipitación anual acumulada : I . De 350 a 600 mm, II .De 600 a 800 mm, III. De 800 a 1000 mm, IV. De 1000 a 1500 mm, V. Más de 1500 mm

Clase	V	IV	III	II	I	x_{ij}
V	1					0,433
IV	1/2	1				0,3305
III	1/4	1/3	1			0,1297
II	1/5	1/6	1/3	1		0,0648
I	1/7	1/9	1/3	1/2	1	0,042
c.r.=0,0338						

Precipitación del mes más seco (mm)

Los periodos de sequía estival son un factor limitante para la supervivencia del pinsapo, habiéndose comprobado, como ya se ha comentado, que aumenta el riesgo para la especie de padecer enfermedades o el riesgo de incendios.

Tabla 6: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de precipitación del mes más seco: I. Menos de 1,17 mm, II. De 1,17 a 2 mm, III. De 2 a 4 mm, IV. De 4 a 7 mm, V. Más de 7 mm.

Clase	V	IV	III	II	I	x_{ij}
V	1					0,4676
IV	1/3	1				0,2934
III	1/4	1/3	1			0,1283
II	1/5	1/6	1/3	1		0,0649
I	1/6	1/7	1/3	1/2	1	0,0458
c.r.=0,0585						

Altitud (m)

El pinsapo se desarrolla en torno a los 1000 y 1800 metros y en general la máxima densidad de las masas se encuentra en torno a los 1300m.

Tabla 7: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de altitud. I. Menos de 500 m, II. Entre 500 y 800 m, III. Entre 800 y 1000 m, IV. Entre 1000 y 1600 m, V. Más de 1600 m

Clase	IV	V	III	II	I	x_{ij}
IV	1					0,4678
V	1/2	1				0,3196
III	1/5	1/4	1			0,1228
II	1/7	1/6	1/3	1		0,0552
I	1/9	1/8	1/5	1/2	1	0,0346
c.r.= 0,0378						

Orientación (grados)

Las orientaciones de umbría favorecen el crecimiento de la especie siendo la exposición norte la óptima, ofreciendo resguardo ante la insolación y mayor grado de humedad debido a la menor evaporación.

Tabla 8: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de orientación. I. Llano (-1) o entre 157'5º y 202'5º (S) , II. Entre 112,5º y 157'5º o entre 202'5º y 247'5º (SE)-(SW) , III. Entre 67'5 y 112'5 o entre 247'5 y 292'5 (E)- (W), IV. Entre 22'5 y 67'5 o entre 292'5 y 337'5 (NE) – (NW), V. Entre 0 y 22'5 o entre 337,5 y 360 (N)

Clase	I	II	III	IV	V	x_{ij}
I	1					0,4638
II	1/2	1				0,2943
III	1/5	1/3	1			0,1478
IV	1/7	1/6	1/4	1		0,0662
V	1/9	1/8	1/7	1/5	1	0,0279
c.r.=0,089						

Compound Topographic Index

Los valores de CTI más altos evidencian una mayor capacidad del territorio para retener agua, lo cual se asume como favorable para la supervivencia del pinsapo.

Tabla 9: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada clase en el criterio de CTI. I. De -12 a 2, II. De 2 a 4, III. De 4 a 6, IV. De 6 a 8, V. Más de 8

Clase	V	IV	III	II	I	x_{ij}
V	1					0,4676
IV	1/3	1				0,2934
III	1/4	1/3	1			0,1283
II	1/5	1/6	1/3	1		0,0649
I	1/6	1/7	1/3	1/2	1	0,0458
c.r.=0,0585						

Para evaluar el peso de cada una de las variables (w_j) para la obtención de zonas aptas para el crecimiento de *Abies pinsapo* volvemos a utilizar la matriz de comparación por pares, de nuevo tendremos que fijarnos en el nivel de consistencia de la asignación (c.r.)

Tabla 10: Matriz de comparación por pares para asignar el peso de cada variable/criterio en el proceso de EMC . I. Precipitación anual acumulada (mm) , II. Altitud (m) , III. Orientación (grados) , IV. Precipitación mínima (mm) , V. Compound Topographic Index .

Clase	I	II	III	IV	V	x_{ij}
I	1					0,4236
II	1/2	1				0,3081
III	1/3	1/3	1			0,1778
IV	1/7	1/6	1/5	1		0,0575
V	1/8	1/7	1/7	1/3	1	0,033
c.r.=0,0642						

3.2.2. Suma Lineal Ponderada

Aplicamos el método de Sumatoria Lineal Ponderada, técnica compensatoria aditiva, para valorar el grado de adecuación de cada localización para la supervivencia de *A.pinsapo* teniendo en cuenta los criterios descritos. Como se explicó anteriormente, el resultado se obtiene sumando cada criterio por su peso. El resultado se reclasificó obteniéndose las siguientes clases de adecuación del terreno para la supervivencia del pinsapo:

Tabla 11: resultados globales de superficie (ha) por nivel de adecuación para el desarrollo de masas de *Abies pinsapo* obtenido mediante Suma Lineal Ponderada.

	Nivel de adecuación	Nº de píxeles	Superficie (ha)
Suma lineal ponderada	Mala	6804360	68043,6
	Media	5030960	50309,6
	Buena	2724109	27241,09
	Excelente	1384200	13842

3.2.3. Modelo de análisis mediante comparación por pares y suma lineal ponderada

Las variables de entrada se han reclasificado mediante la extensión AHP 1.1 disponible para ArcGis 9, otorgándole el peso calculado mediante la matriz de comparación por pares a cada clase (tablas 4 a 8). A continuación se ha llevado a cabo la operación de superposición con *Raster Calculator* introduciendo los pesos calculados en la matriz de comparación por pares de variables (tabla 9) a la que se ha agregado las restricciones.

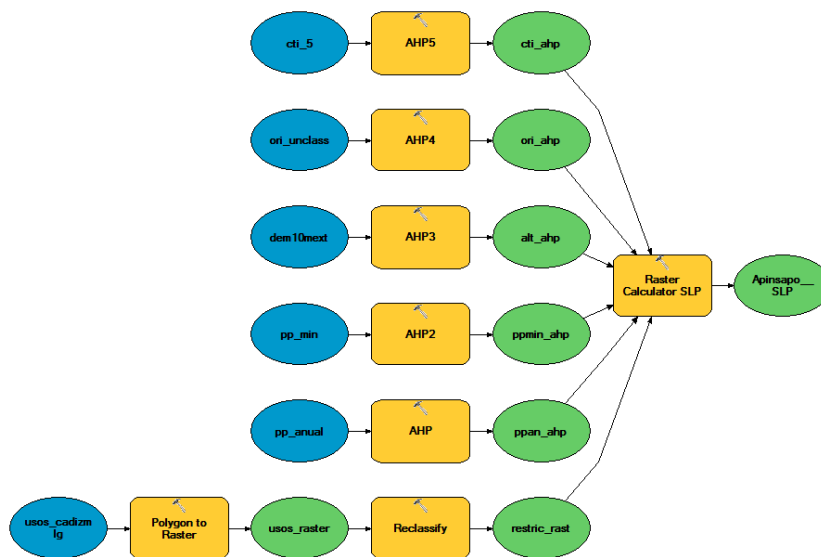


Figura 14: Modelo de análisis de distribución de *A. pinsapo*

El resultado es un mapa de distribución que muestra la potencialidad del terreno para la supervivencia de *A.pinsapo* en una escala de 0 a 1.

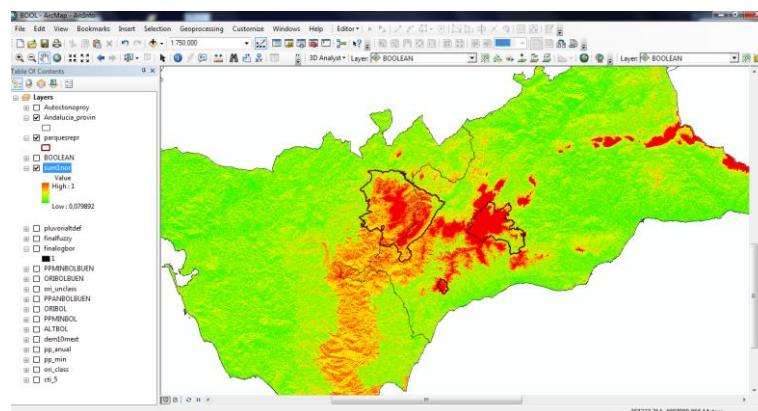


Figura 15: Mapa de distribución potencial derivado del análisis de comparación por pares y suma lineal ponderada.

3.3. Obtención de la distribución potencial de *A. pinsapo* mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.

Para aplicar la asignación y superposición borrosa debemos definir el modelo en términos lingüísticos en conjuntos borrosos asignando a cada variable su función de pertenencia que nos permitirá ubicar las zonas con mayores posibilidades de pertenecer al conjunto favorable para cada criterio, cuyos valores estarán más cerca de 1.

3.3.1. Asignación de pertenencia borrosa

La asignación de la función de pertenencia depende del conjunto de datos que tratemos y la función de transformación que mejor los represente, aunque usualmente se han usado funciones sigmoideas para la asignación de funciones de pertenencia en estudios de distribuciones de especies (Eastman, 1997).

Precipitación anual acumulada (mm)

Para asignar la función de pertenencia al criterio precipitación anual tendremos en cuenta que los valores más altos (zonas con mayor precipitación) serán más aptos para la supervivencia del pinsapo.

Para ello elegimos la función Alta difusa, que asignará a los valores más altos (mayor precipitación) una mayor posibilidad de pertenecer al conjunto. Especificamos el valor del punto medio (950mm) a la que se asignará un valor de pertenencia al conjunto de 0,5 y una amplitud de 4.

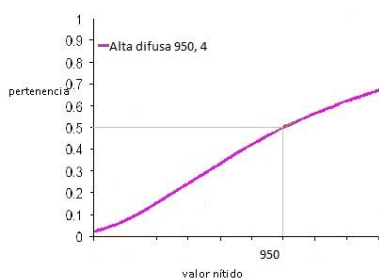
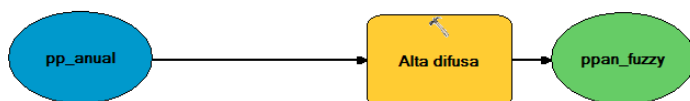


Figura 16: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa a la precipitación anual acumulada.



Precipitación del mes más seco (mm)

Como en el caso anterior, los valores más altos de precipitación del mes más seco serán más favorables para el desarrollo del pinsapo, por ello de nuevo asignaremos la pertenencia con la función Alta difusa, que hará que los valores más altos de precipitación tengan un valor más alto de posibilidad de pertenencia al conjunto. Fijamos el punto medio en 7 mm y una amplitud de 3.

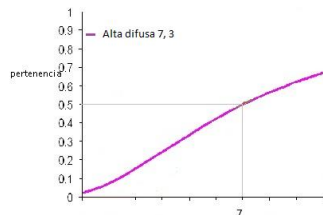
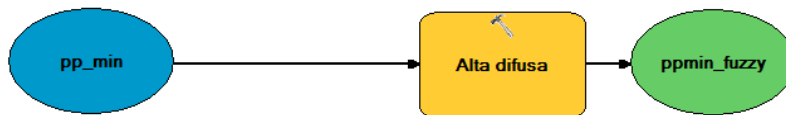


Figura 17: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa a la precipitación del mes más seco.



Altitud (m)

Los valores de altitud entre 1000 y 1800 metros son favorables para la supervivencia del pinsapo, teniendo su máximo desarrollo en torno a los 1300 metros. Para simbolizar ésta preferencia usamos la función Gaussiana difusa, especificando el punto medio en 1300 metros (valores más altos de pertenencia). De esta forma los valores de pertenencia irán aumentando conforme vamos aumentando la altitud para volver a descender a partir de los 1300m. Se especifica una amplitud de 0,0005.

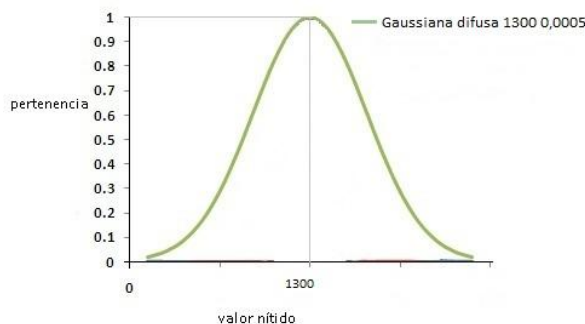
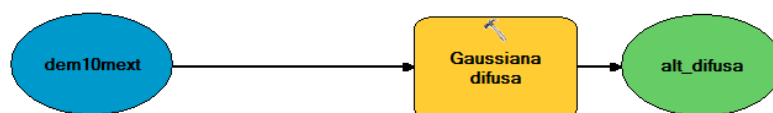


Figura 18:Asignación de función de pertenencia mediante función Gaussiana difusa a la altitud.



Orientación (grados)

La orientación Norte (entre 0º - 22,5º y 337,5- 360º) es la óptima para el desarrollo del pinsapo. La aptitud va disminuyendo según nos alejamos de ésta. Para reflejar este comportamiento usamos de nuevo la función Gaussiana difusa, primero teniendo en cuenta como punto medio (óptimo) 11º y después 349º que serán conectadas mediante el operador OR. Especificamos una amplitud de 0,005.

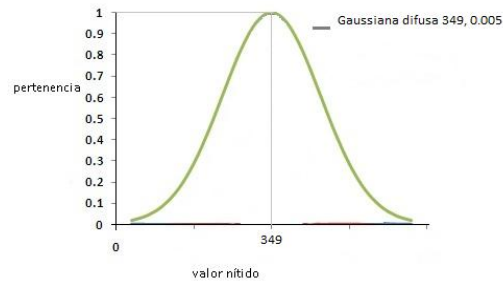
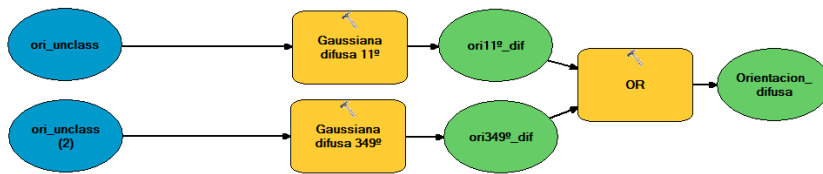
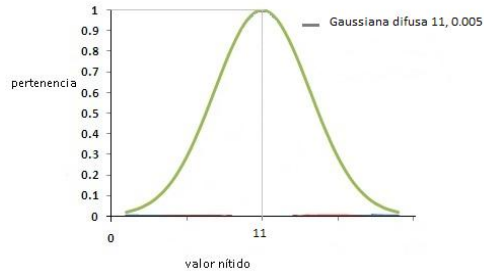


Figura 19: Proceso de asignación de función de pertenencia a la orientación.

Compound Topographic Index

Para simbolizar la mayor adecuación de los niveles de CTI más altos usamos la función Alta difusa con punto medio (adecuación de 0,5) de 7 mm.

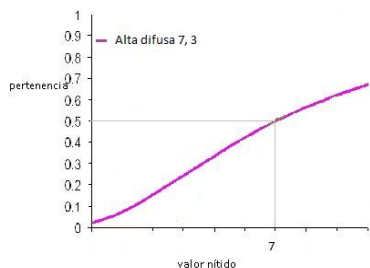
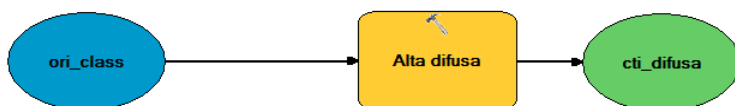


Figura 20: Asignación de función de pertenencia mediante función Alta difusa al CTI.



3.3.2. Superposición borrosa

Una vez normalizados cada uno de los criterios mediante la función de pertenencia borrosa podremos utilizar los operadores para realizar la superposición borrosa.

Ésta superposición se basa en la teoría de conjuntos, el resultado será la posibilidad de que cada celda pertenezca a cada conjunto definido por los criterios, es decir, una vez definidos los conjuntos favorables para cada una de las variables, podremos explorar las posibilidades de combinar varios conjuntos (mediante los operadores) para obtener las localizaciones (celdas) que se adapten a los criterios definidos para todos los conjuntos favorables.

-Factor pluviométrico

Combinamos los criterios precipitación anual acumulada y precipitación del mes más seco mediante el operador OR cuyo resultado serán los valores de pertenencia máximos para cualquiera de los dos criterios (valores de precipitación anual máximos y valores de precipitación del mes más seco máximos).

-Factor topográfico

Para tener en cuenta los criterios topográficos tendremos que añadir las variables altura y orientación al modelo, el compound topographic index (CTI) en este caso no se tiene en cuenta ya que no aporta mucha información para el resultado final.

-Zonas más aptas para el crecimiento de *Abies pinsapo*:

Los resultados de las operaciones anteriores se asocian mediante el operador AND que extraerá los valores de mínimo denominador común para la pertenencia del factor pluviométrico y el topográfico (es decir, obtendremos con un valor mayor de posibilidad de pertenencia al conjunto favorable –más cerca de 1- los valores más altos de precipitación anual acumulada y del mes más seco pero que a la vez sean los más altos para la orientación y altura).

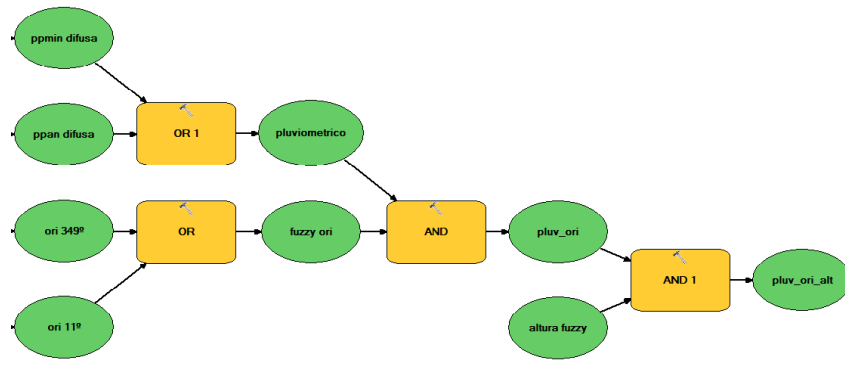


Figura 21: Modelo de análisis para la obtención de zonas más aptas para *Abies pinsapo* mediante lógica borrosa.

3.3.4. Modelo de análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa

Como hemos descrito, se asignan a cada una de las variables las funciones de pertenencia para después llevar a cabo la superposición borrosa con la que obtendremos el mapa de distribución potencial, al que mediante superposición de nuevo añadiremos las restricciones.

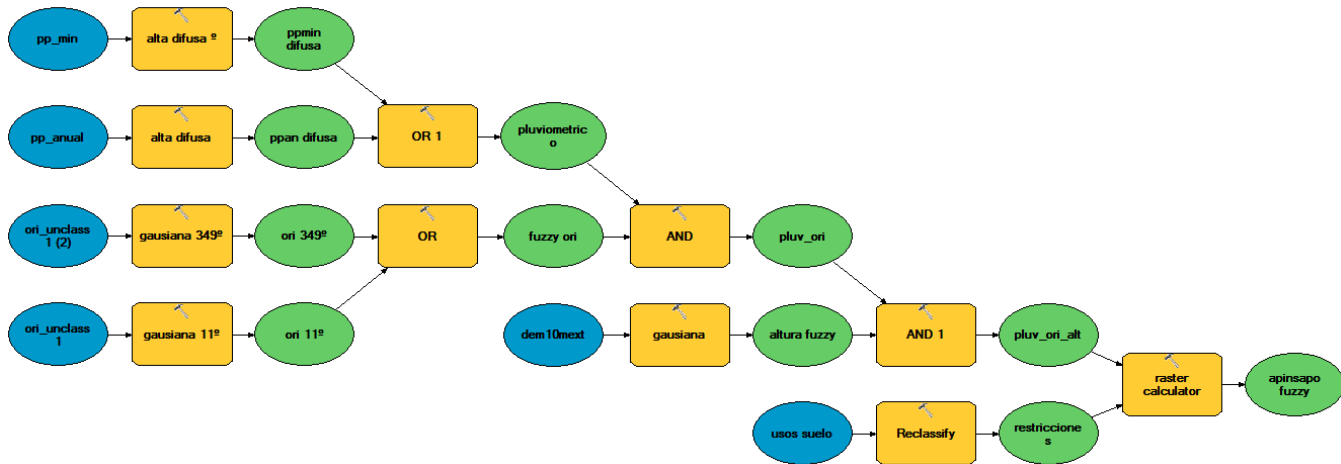


Figura 22: Modelo de análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.

El resultado es el mapa de adecuación difusa a las necesidades de *Abies pinsapo* en el que obtenemos en una escala de 0 (menor adecuación) a 1 (mayor adecuación) las localizaciones óptimas para su supervivencia.

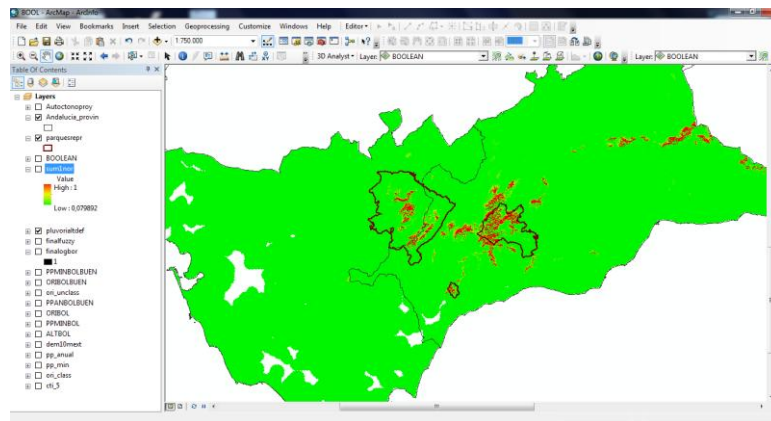


Figura 23: Mapa de distribución potencial derivado del análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición borrosa.

4-.Resultados

Una vez elaborados los mapas de distribución potencial por cada uno de los métodos descritos podemos comparar los resultados generales que se extraen de cada uno de ellos para el área de ocupación óptima para el *Abies pinsapo*.

Como se observa en la tabla 12 los resultados para cada uno de los métodos son considerablemente diferentes siendo el método de Suma Lineal Ponderada el que mayor área potencial para *A. pinsapo* estima, seguido por la técnica de asignación y superposición borrosa. El análisis booleano es la técnica que proporciona el resultado global menor de superficie potencial óptima para pinsapo.

Tabla 12: Resultados totales para la distribución potencial de *A. pinsapo* por cada uno de los métodos considerados.

	Nivel de adecuación	Nº de píxeles	Superficie (ha)
Análisis booleano	Apta	636702	6367,2
Suma lineal ponderada	Mala	6804360	68043,6
	Media	5030960	50309,6
	Buena	2724109	27241,09
	Excelente	1384200	13842
Lógica y superposición borrosa	Óptima	971149	9711,49

En el caso de la Suma Lineal Ponderada los resultados para las adecuaciones Buena y Media son mucho menores que el resultado de zonas de potencialidad muy baja para el desarrollo de la especie.

Cabe señalar que haber utilizado una resolución de 10m hace que el error en los cálculos de superficies finales sea mínimo.

En el desglose de superficie potencial por las localizaciones de presencia actual (tabla 13) se repite la misma regla siendo la Suma Lineal Ponderada la que arroja mayores resultados en los tres casos.

Para los tres métodos la zona que presenta mayor potencialidad es el Parque Natural de Sierra de las Nieves, que es también el lugar con mayores poblaciones de pinsapo en la actualidad con una superficie ocupada de en torno 2000 ha. Por detrás de éste está el Parque Natural de Sierra de Grazalema con alrededor de 1500 ha y por último el Paraje Natural de Sierra Bermeja con menos de 100 ha.

Tabla 13: Superficie potencial y superficie ocupada de *A.pinsapo* en los Parques Naturales de Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves y en el Paraje Natural de Sierra Bermeja.

	Análisis booleano	Suma lineal ponderada	Lógica-superposición borrosa	Área ocupada
P.N. S ^a Grazalema	2228,39	5398,1	1862,33	1579,68
P.N. S ^a Nieves	1541,23	3297,23	2371,83	2272,46
PJ. N. S ^a Bermeja	65,5	247,82	150,84	67,64

En la figura 24 se representa el tanto por ciento de superficie potencial ocupada en cada localización por cada método respecto al área potencial total. Excepto para el análisis booleano (que parece que subestima la superficie) ; en todos los casos la superficie potencial es mayor que la ocupada.

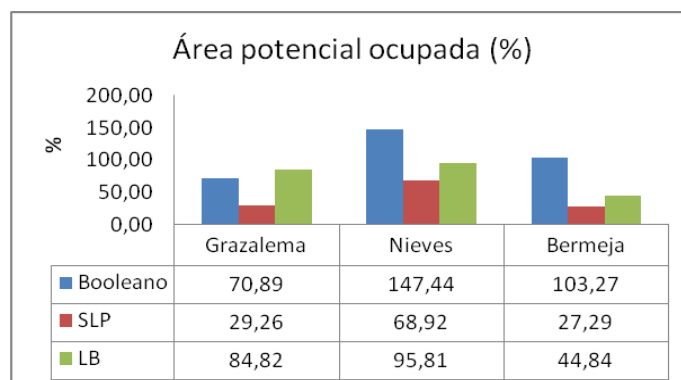


Figura 24: Superficie potencial ocupada de *A. pinsapo* (%) respecto al área potencial para cada localización especificada para cada métodos de cálculo (Análisis Booleano, Suma Lineal Ponderada-SLP- y Lógica Borrosa –LB-).

La tabla 14 analiza la superficie potencial de desarrollo de pinsapo que se encuentra protegida, en todos los casos hay un elevado número de zonas que se encuentran fuera de cualquier figura de protección.

Tabla 14: superficie potencial protegida y fuera de protección (ha) de *A.pinsapo* en las provincias de Cádiz y Málaga.

	Booleano	SLP	LB
Área potencial protegida	3835,12	8943,15	4385
Área potencial sin protección	2532,08	4898,85	5326,49

Independientemente del método de cálculo que se utilice, como se observa en la figura 25, una considerable proporción del área potencial total se encuentra fuera de cualquier figura de protección, siendo de nuevo la Suma Lineal Ponderada la que más altos porcentajes muestra en comparación con la Lógica Borrosa o el Análisis Booleano. En todos los casos la superficie protegida supone sólo alrededor de la mitad del área potencial de desarrollo de la especie.

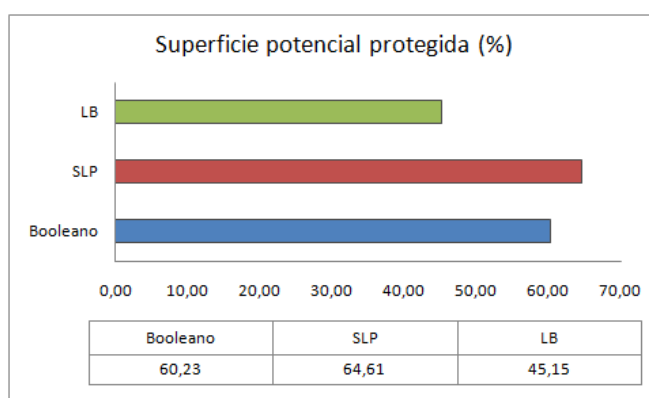


Figura 25: porcentaje del hábitat potencial de *A.pinsapo* incluido en espacios de la Red Natura 2000 teniendo en cuenta los diferentes métodos de cálculo (Análisis Booleano, Suma Lineal Ponderada-SLP- y Lógica Borrosa –LB-).

A continuación se presentan las fichas resumen para cada localización especificada para cada método que incluye una tabla en la que se detallan las hectáreas potenciales por cada municipio.

Distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Parque Natural de Sierra de Grazalema (Cádiz)

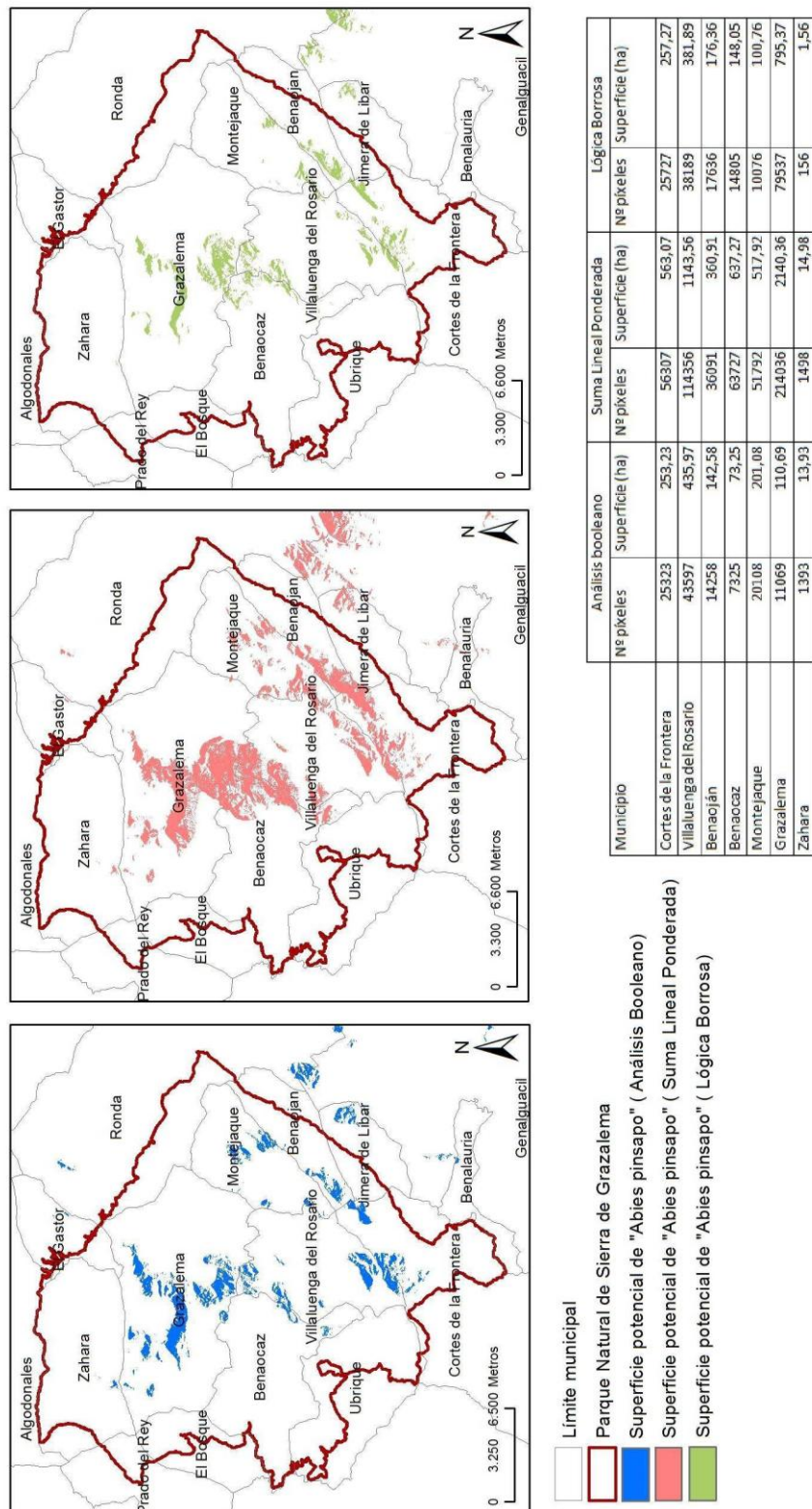


Figura 26: Ficha resumen de la distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Parque Natural de Sierra de Grazalema

Distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Parque Natural de Sierra de las Nieves (Málaga)

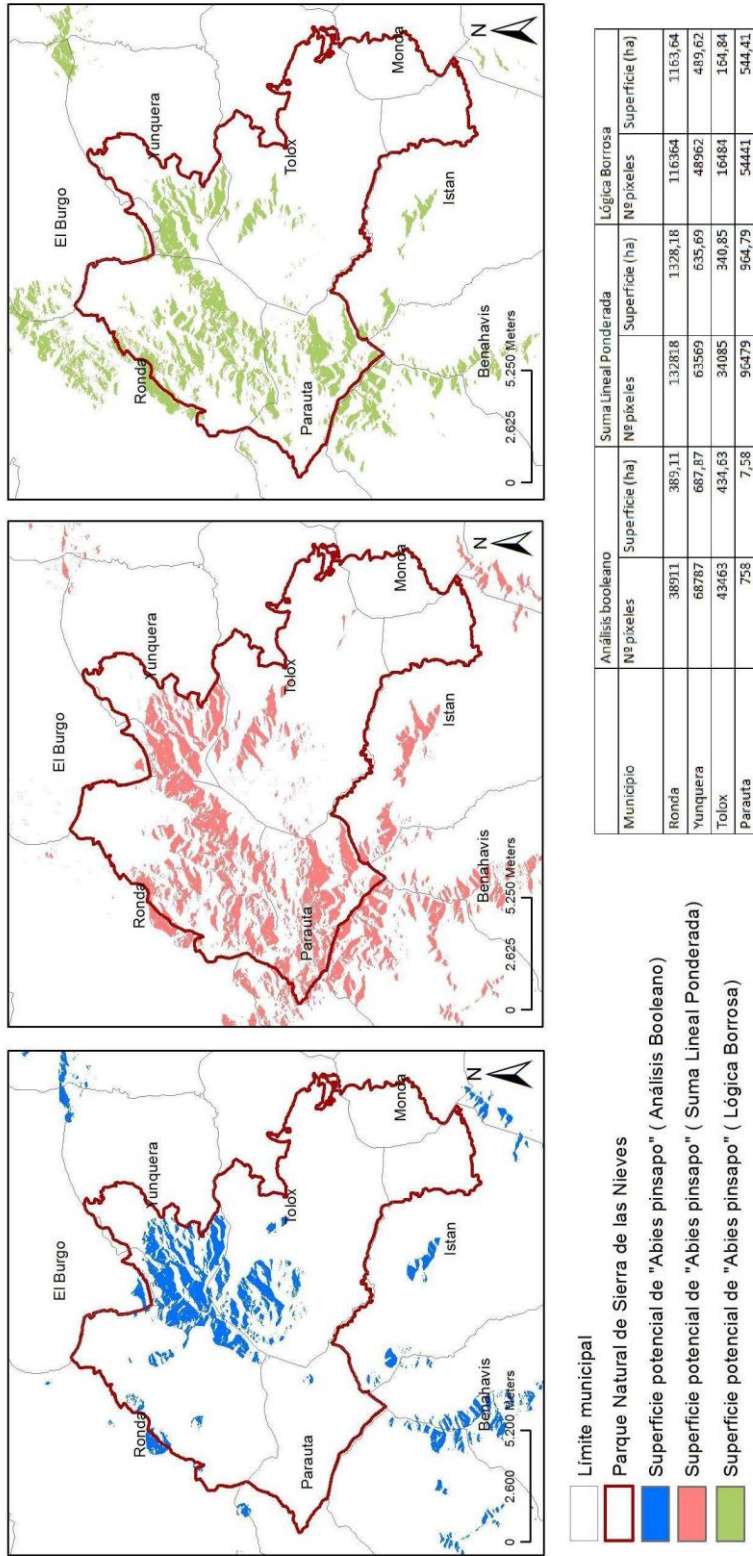


Figura 27 : Ficha resumen de la distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Parque Natural de Sierra de las Nieves

Distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Paraje Natural de Sierra Bermeja (Málaga)

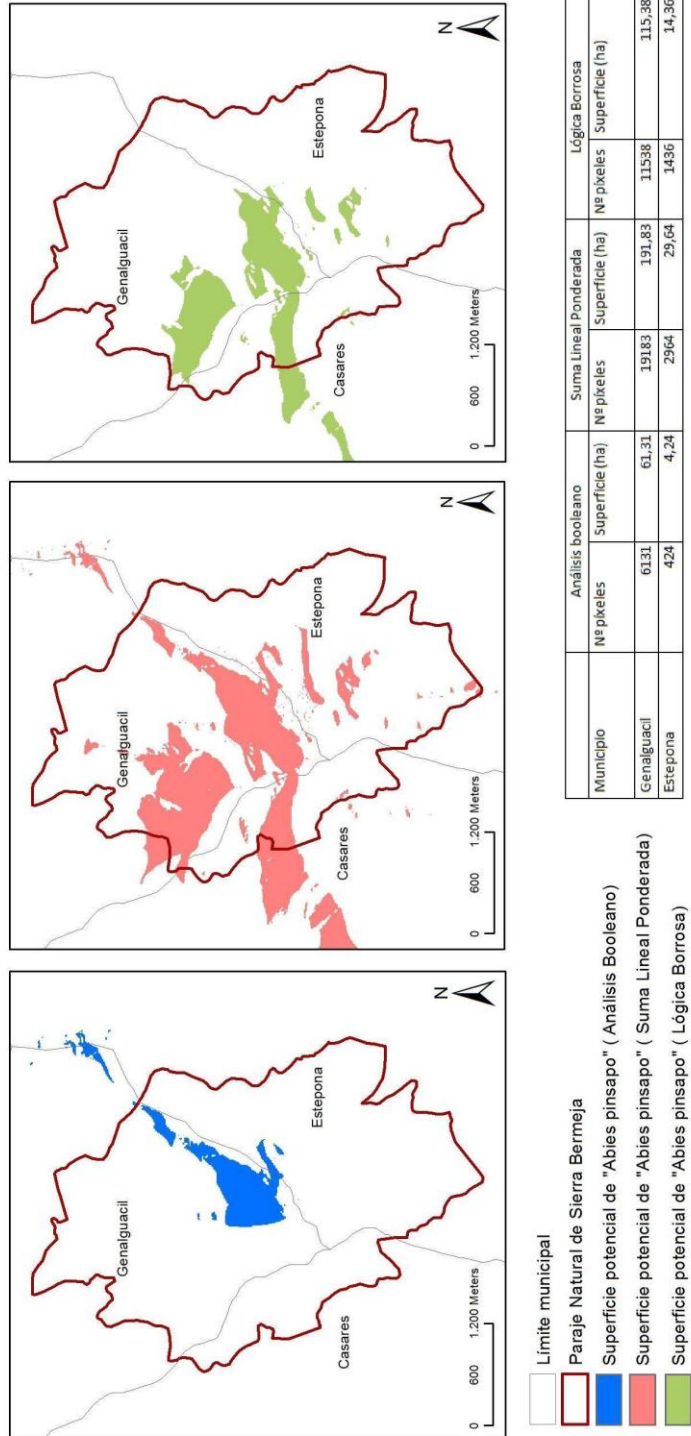


Figura 28 : Ficha resumen de la distribución potencial de "Abies pinsapo" en el Paraje Natural de Sierra Bermeja

5.-Comparación de resultados y conclusiones

Dadas las características de la especie, el estudio pronosticaba buenos resultados *a priori* con el uso de variables como la altura, orientación o precipitación anual acumulada, hecho que se corrobora al comprobar que las diferentes técnicas han incorporado de manera correcta la presencia actual de la especie.

Uno de los puntos críticos para mejorar la calidad del modelo es la selección de variables y la cuantificación de su contribución al fenómeno que tratan de evaluar, en este caso la presencia de *Abies pinsapo*.

El uso de diferentes métodos para el cálculo es en sí un análisis de sensibilidad, aunque podrían introducirse variaciones en el número y naturaleza de criterios utilizados en el análisis, así como en los pesos otorgados a cada variable para explorar los resultados y ver si las diferencias son significativas. Las variables utilizadas son válidas para evaluar el área potencial de distribución de la especie, no obstante, éstas no explican nada a cerca de la capacidad dispersiva del *A. pinsapo* que podría ser un factor limitante para su expansión.

A pesar de la incertidumbre en la elección de las variables, el empleo de varios métodos para el cálculo de la superficie potencial nos permite la comparación entre ellos pudiendo afirmar con seguridad que el área de distribución potencial del pinsapo, a pesar de sus exigentes necesidades, es mucho mayor que su área de distribución actual. El pinsapo ocupa un relativamente pequeño porcentaje de superficie respecto a su superficie potencial de desarrollo, como ocurre con otras especies de árboles entre los que se encuentra el *Abies alba* (Svenning & Skov, 2004). La explicación de este comportamiento limitado en la dispersión a zonas cercanas con elevada potencialidad para el crecimiento de la especie podría responder a muchas y desconocidas causas, como por ejemplo como ya hemos comentado la limitada capacidad dispersiva de la especie.

Otro aspecto a tener en cuenta en la elaboración de mapas de distribución potencial es el efecto que los cambios drásticos de los regímenes de temperaturas y precipitaciones de los últimos años tendrán en las especies. Podríamos haber tenido en cuenta diferentes escenarios climáticos previstos para los próximos años. El pinsapo será una de las especies más afectadas por estos cambios (Felicísimo et al., 2011), a pesar de éstas previsiones el pinsapo ha experimentado un aumento en su distribución en las últimas décadas derivadas de la mejora en su conservación, por lo que es importante identificar las zonas actuales de potencial desarrollo para que las tareas de conservación se enfoquen en las mismas.

Según los resultados el empleo de Análisis Booleano subestima las áreas potenciales de distribución, probablemente porque asume que todos los criterios son exactamente igual de importantes y restrictivos, mientras que la Suma Lineal Ponderada sobreestima los valores

finales ya que es posible que alguno de los criterios tenga un peso excesivo sobre el resto, en este caso la altura, minimizando el de otras como la precipitación anual o mínima. El uso de la asignación de funciones de pertenencia y superposición borrosa proporciona unos resultados finales entre los valores de los dos métodos anteriores, asumiendo entonces que es el que produce resultados más realistas.

La posibilidad que ofrece la lógica borrosa para modelar los fenómenos ambientales de forma gradual sin tener que delimitar las clases permite introducir las variables de forma menos parcial, lo cual redundará en un resultado más ajustado a la realidad.

El resultado final del análisis mediante asignación de función de pertenencia borrosa y superposición produce valores finales de posibilidad de pertenencia a los conjuntos especificados como favorables que asumimos como zonas de elevada potencialidad para la supervivencia del pinsapo, sin embargo habría que comprobar los resultados una vez traducidos los valores de posibilidad a valores nítidos (*defuzzification*).

Otros estudios sobre el área potencial de distribución del pinsapo (Alba-Sánchez et al., 2010; Cerrillo et al., 2006) obtienen resultados para la localización de las áreas de mayor potencialidad muy similares a los del presente trabajo, aunque las diferencias entre los valores de los límites para la definición de zonas de potencialidad óptima y zonas de potencialidad elevada no son exactamente los mismos, coinciden en ubicar los terrenos con mayor potencialidad en las cumbres con orientación Norte de la Serranía de Ronda y alrededores de la Sierra de Grazalema.

Por otra parte una gran proporción de la superficie potencial de pinsapo está fuera de las figuras de protección (Parques de Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves y Paraje Natural de Sierra Bermeja). Estas zonas no protegidas deberían ser tenidas en cuenta para posibles repoblaciones o ampliaciones de las zonas protegidas, así como la consideración de un área de estudio mayor que no esté reducida a las provincias de Cádiz y Málaga y que incluyera todo el extremo sur de la Península y la zona de levante e incluso el Norte de Marruecos donde probablemente las condiciones sean favorables para el desarrollo de la especie.

En definitiva los modelos de distribución potencial, basados en técnicas multicriterio revelan ser una útil herramienta de gestión medioambiental ya que están basados en procedimientos objetivos sirviendo de base para la toma de decisiones

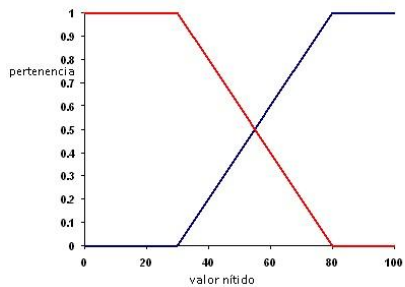
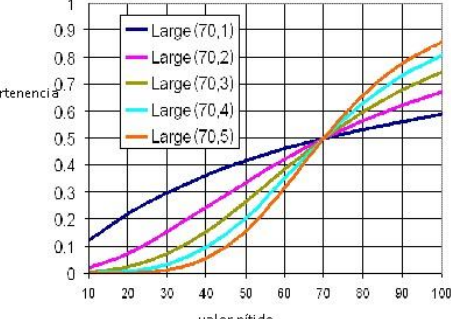
6-Bibliografía

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J. a, Pando, B. B.-de, Linares, J. C., Nieto-Lugilde, D., & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214-228.
- Arista M., F. Herrera, S. T. (1997). *Biología del pinsapo. Flora* (p. 162). Sevilla: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Barredo Cano, J. I., & Gómez Delgado, M. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio.*(2ªEd.) (p.2312). RA-MA.
- Blanca, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J. E., Molero, J., Muñoz, J., & Valdés, B. (2000). *Libro Rojo de la Flora Silvestre Amenazada de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente Junta de Andalucía.
- Cerrillo, R. M. N., & Fernández, R. F. (2007). Climate classification of *Abies pinsapo* Boiss . forests in Southern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. Fuera de serie*, 16(3), 222-229.
- Cerrillo, R. M. N., Fernández, A. L., Oyonarte, P. B., Martínez, C. C., Quintanilla, J. L., Cancio, A. F., Álvarez, J. R. G., et al. (2006). Aproximación a la definición del habitat fisiográfico del *Abies pinsapo* Boiss . en Andalucía Introducción. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. Fuera de serie*, 137-152.
- Eastman, J.R. (1993). *IDRISI. Versión 4.1. Update manual*, Worcester, Ma, ClarkUniversity.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno* (p. 222). Oviedo.
- Felicísimo, A. M. (2003). Uses of spatial predictive models in forested areas. Territorial planning. *CIOT 2003-IV INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPATIAL PLANNING*, 1-15.
- Felicísimo, A., Muñoz, J., Villalba, C. J., & Mateo, R. G. (2011). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española.2.Flora y vegetación* (p. 552). Madrid: Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Gonzalo Jimenez, J. (2010). *Diagnosis fitoclimática de la España Peninsular : hacia un modelo de clasificación funcional de la vegetación y de los ecosistemas peninsulares españoles*. Organismo Autónomo Parques Nacionales
- Linares, J. C., Viñegla, B., & Carreira, J. A. (2003). Caracterización estructural de poblaciones de *Abies pinsapo* Boiss. en la Sierra de Yunquera (Málaga). *Iniciación a la investigación. Revista electrónica. Universidad de Jaén.*, 1-10.

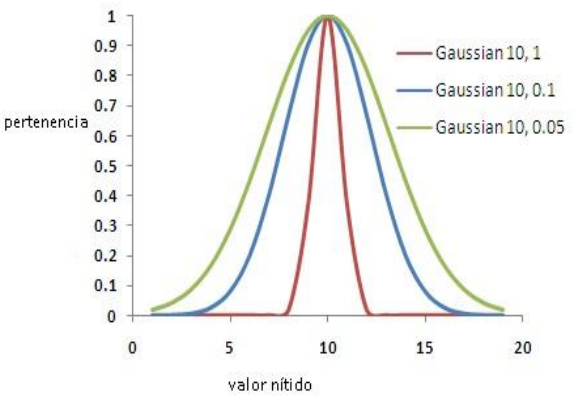
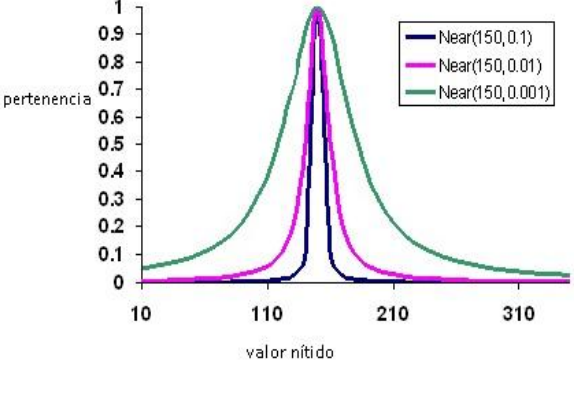
- Linares, J C ; Carreira, J. A. (2006). El pinsapo , abeto endémico andaluz . O , ¿ Qué hace un tipo como tú en un sitio como éste ? *Ecosistemas*, 3, 21.
- Lofti Zadeh (1965). *Fuzzy sets. Information and Control*. 8: 338–353.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis* (p. 392). New York: J. Wiley & Sons.
- Marioni, O. (2004): “Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS”, *Computers and Geosciences*, 30, 6, pp. 637-646.
- Raines, Gary L.; Sawtzky, Don L. ;Bonham -Carter, G. (2010). Incorporating Expert Knowledge. *ArcUser. The Magazine for ESRI software users*, 14(2), 8-13.
- Rivas-Martinez, S. (1987). *Memoria del mapa de series de vegetación de España* (p. 268). Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación I.C.O.N.A.
- Svenning, J.-C., & Skov, F. (2004). Limited filling of the potential range in European tree species. *Ecology Letters*, 7(7), 565-573.

ANEXO A

Funciones de pertenencia borrosas disponibles en la herramienta Fuzzy Membership de ArcGis 10. Información extraída de la ayuda online del propio programa.

	Descripción	Definición	
Lineal difusa	<p>Función lineal entre los valores mínimos y máximos introducidos por el usuario. A todo lo que esté por debajo del mínimo se asignará un 0 y a todo lo que esté por encima del máximo, un 1.</p> <p>Ej: criterios de distancia a un punto</p>	<p>$\mu(x) = 0$ si $x < \min.$ $\mu(x) = 1$ si $x > \max.$</p> <p>Ó</p> $\mu(x) = \frac{(x - \min.)}{(\max - \min.)}$	
Alta difusa	<p>Los valores de entrada más altos tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto. El punto medio definido identifica el punto de cruce (al que se asigna una pertenencia de 0,5).</p> <p>Ej: transformación de los valores de distancia a un vertedero. (más lejos del vertedero, más posibilidad tienen de pertenecer al conjunto de adecuación favorable).</p>	$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{x - f1}{f2}}$ <p>Donde $f1$ y $f2$ son parámetros introducidos por el usuario, $F1$ es la amplitud y $f2$ el punto medio.</p>	
Alta difusa ME	<p>Similar a la función Alta difusa, excepto que la definición de la función está basada en una desviación media y una desviación estándar especificadas.</p>	$\mu(x) = 1 - \frac{bs}{x + am + bs}$ <p>si $x > am$ sino $\mu(x) = 0$</p> <p>Donde m= media, s=desviación estándar, b y a son modificaciones introducidas por el usuario.</p>	

<p>Baja difusa</p>	<p>Los valores de entrada más bajos tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto. El punto medio definido identifica el punto de cruce (al que se asigna una pertenencia de 0,5) Los valores mayores que el punto medio tienen una posibilidad menor de pertenecer al conjunto y los valores por debajo del punto medio tienen una posibilidad mayor de pertenencia.</p> <p>Ej: Distancia a suministros de energía. A medida que se incrementa la distancia a las líneas de suministro de energía, resulta más costoso acceder a ellas, por lo que es menos probable que las ubicaciones pertenezcan al conjunto adecuado favorable.</p>	$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{x - f1}{f2}}$ <p>Donde f1 y f2 son parámetros introducidos por el usuario, f1 es la amplitud y f2 el punto medio.</p>	
<p>Baja difusa ME</p>	<p>Similar a la función Baja difusa, excepto que la definición de la función está basada en una desviación media y una desviación estándar especificadas</p>	$\mu(x) = \frac{bs}{x + am + bs}$ <p>si $x > am$ sino $\mu(x) = 0$</p> <p>Donde m= media, s=desviación estándar, b y a son modificaciones introducidas por el usuario.</p>	

<p>Gaussiana difusa</p>	<p>Transforma los valores originales en una distribución normal. El punto medio de la distribución normal determina la definición ideal para el conjunto, a la que se asigna un 1; la pertenencia del resto de los valores de entrada disminuye a medida que se alejan del punto medio, tanto en la dirección positiva como en la negativa</p> <p>Ej: ganancia de calor solar en un modelo de adecuación de viviendas, el Sur (180 grados) puede ser la orientación ideal para la construcción, y las orientaciones menores o mayores que 180 son menos favorables o tienen menos posibilidades de pertenecer al conjunto de adecuación ideal.</p>	$\mu(x) = e^{-f1*(x-f2)^2}$ <p>Donde f1 y f2 son parámetros Introducidos por el usuario, F1 es la amplitud y f2 el punto medio.</p>	 <p>El gráfico muestra tres curvas gaussianas en un sistema de coordenadas donde el eje horizontal es 'valor nítido' (rango 0-20) y el eje vertical es 'pertenencia' (rango 0-1). Las curvas son: una roja muy estrecha y alta (Gaussian 10, 1), una azul de anchura moderada (Gaussian 10, 0.1), y una verde más ancha y baja (Gaussian 10, 0.05). Todas las curvas están centradas en el valor 10.</p>
<p>Cercana difusa</p>	<p>Útil si la pertenencia está cerca de un valor específico. La función está definida por un punto medio que determina el centro del conjunto, identifica la pertenencia definitiva y al que, por consiguiente, se asigna un 1. A medida que los valores se alejan del punto medio, tanto en la dirección positiva como en la negativa, la pertenencia disminuye hasta alcanzar el valor 0, el cual define la no pertenencia.</p> <p>La función Cercana difusa disminuye más rápido y tiene una amplitud menor que la función Gaussiana difusa y, por lo tanto, se utiliza cuando los valores más cercanos al punto medio tienen una mayor posibilidad de pertenecer al conjunto.</p>	$\mu(x) = \frac{1}{1 + f1 * (x - f2)^2}$ <p>Donde f1 y f2 son parámetros Introducidos por el usuario, F1 es la amplitud y f2 el punto medio.</p>	 <p>El gráfico muestra tres curvas cercanas en un sistema de coordenadas donde el eje horizontal es 'valor nítido' (rango 10-310) y el eje vertical es 'pertenencia' (rango 0-1). Las curvas son: una azul muy estrecha y alta (Near(150, 0.1)), una magenta de anchura moderada (Near(150, 0.01)), y una verde más ancha y baja (Near(150, 0.001)). Todas las curvas están centradas en el valor 150.</p>