ANEXO II:

- **ANEXO II.A. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS TERRITORIALES DE LAS VARIABLES DE 1º ORDEN**

- **ANEXO II.B. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS TERRITORIALES DE VARIABLES DE 2º Y 3º ORDEN**

ANEXO II.A. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS TERRITORIALES DE LAS VARIABLES DE 1º ORDEN

Denominamos variables meteorológicas de primer orden aquellas que han sido obtenidas directamente mediante la aplicación del donwscaling estadístico con el *método los análogos*. Estas son la temperatura mínima diaria (T_MIN), temperatura máxima diaria (T_MAX), precipitación diaria (PRC), número de días de calor (NDC) y número de días de helada (NDF).

Hasta este momento, el procedimiento empleado ha reconstruido las proyecciones climáticas sobre cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, por lo que partimos de una información confinada solo a los puntos del territorio donde existe una estación, en series temporales diarias. Desde una visión geográfica se trata de series temporales de datos meteorológicos con distribución discreta. **A partir de aquí, el objetivo consiste en construir por medio de esta base de datos un conjunto de variables con sentido climático y una distribución territorial continua.**

En primer lugar, para que tengan un sentido climático es necesario transformar los datos diarios de cada variable en datos agregados por intervalos de tiempo lo suficientemente amplios como para recoger toda la variabilidad del clima. Periodos de más de 30 años son ya considerados por los climatólogos como intervalos suficientes para enclavar un clima. Por otra parte, los datos agregados corresponden a una operación estadística en el periodo de tiempo elegido, y que transforman las series diarias de una variable meteorológica en datos climáticos. Podemos citar como ejemplo la media de la temperatura máxima anual o de un mes concreto, número de días medio anual que supera una determinada temperatura, media anual de la precipitación acumulada, etc.

La agregación por operación estadística de una la variable meteorológica en una estación, da lugar a una variable climática en la misma localización. El resultado para una red es un conjunto de valores únicos de distribución puntual y discreta. En la práctica, este es un resultado poco operativo e incompleto que apenas cubre el territorio. Para extender este valor al resto de la región se suele recurrir a técnicas geoestadísticas que permiten transformar unos datos puntuales de distribución limitada en superficies o mallas regulares (raster o grid) que con una determinada resolución o grado de precisión, permiten asignar un valor a cada punto del terreno.

La metodología a seguir asume que existe por un lado, una relación que puede ser explicada por medio de una correlación lineal entre las variables climáticas observadas y un conjunto de variables geográficas conocidas y de distribución continua y, por otro, un residuo o error que tiene una distribución coherente con la localización, y que puede ser explicado por correlación espacial (*imagen 1*).

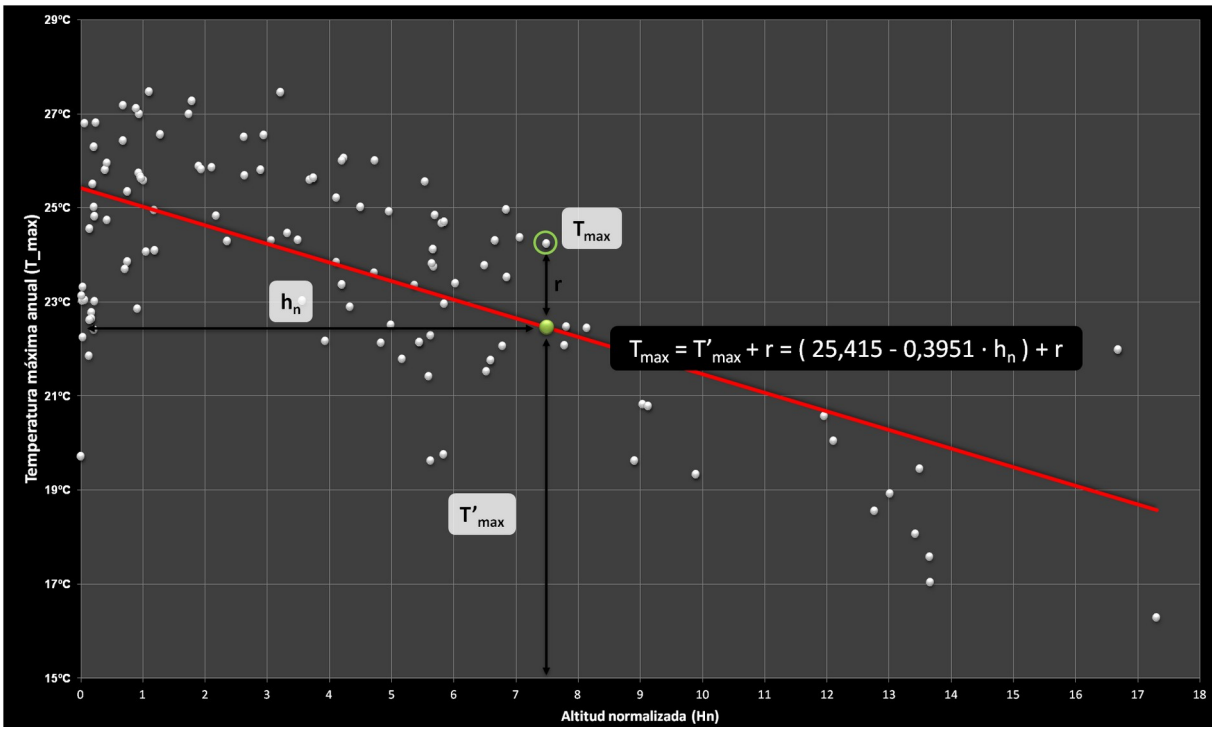

Imagen 1. Modelo de regresión múltiple residual.

Este es un método geoestadístico de regresión múltiple residual, y que en la práctica permite considerar la variabilidad geográfica de una región a la vez que el modelo se ajusta de manera precisa a los valores observados en cada punto. La *imagen 1* representa de manera simplificada el fundamento matemático para una sola variable independiente. En este ejemplo la temperatura máxima anual (T_{max}) es modelada por un sumando determinista representado por una ecuación lineal estimada mediante regresión ($T'_{max} = 25.415 - 3951h_n$), donde la altitud normalizada es la variable independiente, a la que se suma un residuo *(r)*:

$$\mathrm{T_{max}} = T'_{max} + r = (\,25{,}415 - 0{,}3951 \cdot h_n) + r$$

En Andalucía, las variables climáticas de primer orden están relacionadas con determinados parámetros geográficos tales como la altitud, distancia al océano atlántico y mediterráneo. Sin embargo, el comportamiento de estas variables también está muy determinado por los sectores geográficos donde se encuentran. Así las barreras que conforma el relieve dan lugar a un comportamiento diferenciado en poca distancia (*imagen 3)*, ya que en función de la dirección de entrada de los vientos dominantes y frentes húmedos, variables como la precipitación se distribuyen de manera muy diferenciada en sotavento respecto a barlovento, indistintamente de la altitud. Es por este motivo que la reconstrucción de las funciones de regresión se realiza por estratos geográficos definidos por el relieve y orientación a los principales tipo de frentes. La *imagen 2* recoge los estratos considerados en este análisis y que han sido obtenidos mediante simplificación de las unidades biogeográficas de Andalucía y cuencas hidrográficas.

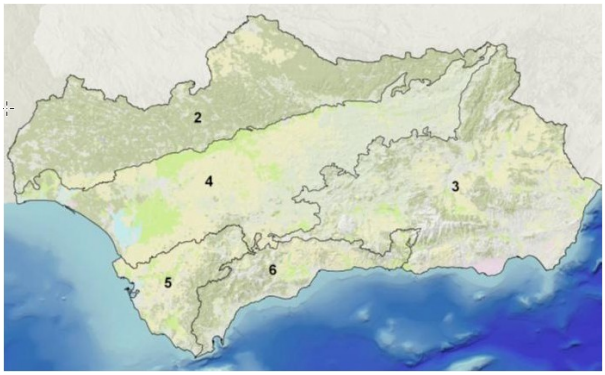

Imagen 2. Regionalización en estratos de la regresión múltiple.

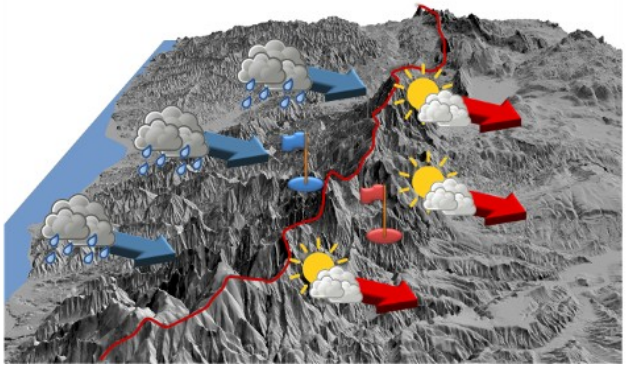

Imagen 3. Diferencias meteorológicas y, por tanto, climáticas, entre puntos relativamente próximos, especialmente en terrrenos topográfic amente complejos

Como ejemplo se facilitan en la *tabla 1* los resultados de la regresión múltiple para el estrato 2 (Sierra Morena), entre la media de la temperatura máxima del mes de mayo (mes = 5) ($T_{max}(5)_2$) para el periodo climático observado 1961-2000 y las variables independientes: altitud (*h*), distancia al océano atlántico (d_1) y distancia al mediterráneo (d_2) (todas normalizadas entre 0 y 100). De esta manera la temperatura máxima del mes de mayo del estrato 2 en el periodo 1961-2000, estaría definida por la siguiente expresión:

$$\mathrm{T_{max}}(5)_2 = 27.77 - 0.55 \cdot h + 0.08 \cdot d_1 - 0.11 \cdot d_2 + r$$

Variable	Descripción	Coeficiente
$T_{max}(5)_2$	*Temperatura máxima del mes de mayo en el estrato 2*	
0	*Termino independiente*	*27.77*
h	*Altitud normalizada*	*0.55*
d_1	*Distancia al océano Atlántico normalizada*	*0.08*
d_2	*Distancia al mar Mediterráneo normalizada*	*-0.11*
r	*Diferencia entre el valor estimado y observado*	

ID Punto	$T'_{max}(5)_2$	r	$T_{max}(5)_2$
1	24.55	-1.19	23.36
2	27.00	1.27	28.27
3	26.29	0.61	26.9
4	25.35	-0.18	25.17
5	25.81	-0.16	25.65
6	24.09	-0.95	23.14
7	25.51	-0.19	25.32
8	24.83	-0.08	24.75
9	25.21	1.12	26.33
10	25.69	1.10	26.79
11	25.89	0.83	26.72
12	24.30	0.28	24.58
13	26.43	-0.60	25.83
14	22.52	-1.08	21.44
15	23.84	-0.54	23.3
16	26.55	-0.31	26.24
17	27.11	-0.14	26.97
18	26.51	2.12	28.63
19	23.35	0.55	23.9
20	27.47	0.30	27.77
21	24.85	1.75	26.6
22	21.42	-1.59	19.83
23	22.95	0.19	23.14

Tabla 1. Resultados de la regresión múltiple para el estrato 2 del mes de mayo en el periodo 1961-2000, según datos observados

Los residuos son calculados para cada estación como la diferencia entre el valor estimado por la regresión múltiple y el valor real observado. Este residuo o error, es asumido como un valor que se encuentra correlacionado espacialmente, infiriendo el resto de puntos del territorio por interpolación. Esto permite obtener para cada estrato dos superficies, la primera de valores estimados mediante la regresión múltiple, y otra, con los valores interpolados de los residuos, cuya suma da lugar al resultado esperado. El procedimiento usado para la interpolación de los residuos es el método del inverso de la distancia, con los mismos parámetros que los usados para el relleno de lagunas.

Finalmente, esta metodología tiene un gran inconveniente a la hora de unificar las superficies de estimación climática obtenidas en cada uno de los estratos, ya que estas son construidas de manera independiente, dando lugar a que en los límites de cada región la función no sea convergente, provocando un efecto borde bastante notable, sobre todo a la hora de visualizar el modelo. Este inconveniente es resuelto en la metodología usando funciones de fusión en integración en los límites de contacto entre superficies. De esta manera los valores de las superficies próximos al borde de los estratos son transformados por una función de fusión del siguiente tipo:

$$w(d)_i = \frac{e}{(e + c \cdot e^{b \cdot d})}$$

Siendo *i* el número de estrato; *b* y *c* parámetros constantes y *d* la distancia mínima al borde del estrato *i*.

Esta es una función sigmoidea con forma y valores asintóticos controlados por los parámetros constantes, que toma valor 1 cuando la distancia al borde del estrato es nula y asintótica a 0 para distancias mayores (*imagen 4*). Es por consiguiente una *función de peso*, que se anula a medida que nos alejamos del estrato. Si hacemos $b = 0.0001$ y $c = 0.0$, $w(10000)_i \approx 0$, con lo que nos aseguramos que a partir de 10 kilómetros no existe dependencia entre los estratos.

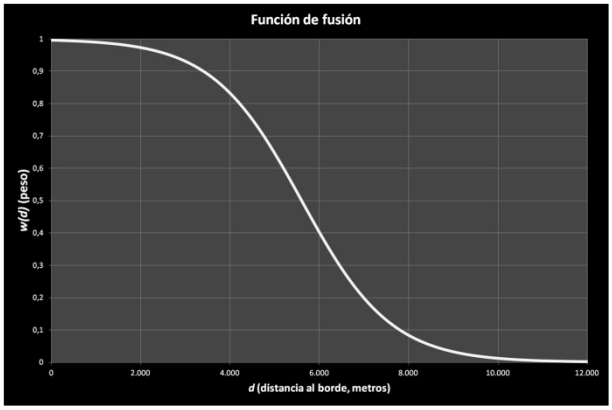

Imagen 4. Función de fusión de estratos.

La unión entre estratos se realiza mediante la siguiente función de integración:

$$V = \frac{\sum_{i=n}^{i=0} V_i \cdot w(d)_i}{\sum_{i=1}^{0} w(d)_i}$$

Siendo *i* el número de estrato, *n* el número total de estratos, *V* la variable climática integrada, V_i la variable para el estrato *i*. *w(d) media ponderada por el peso de cada estrato.*

Como puede observarse estudiando esta última función, la variable climática integrada toma en el borde de los estratos el valor medio de las superficies por separado. Para el resto del territorio la función de integración constituye una media ponderada por el peso de cada estrato $w(d)_i$.

La *imagen 5* es la representación de la temperatura máxima media anual para el periodo 1961-2000, según los datos observados, obtenida mediante la aplicación de este método.

La obtención de los modelos digitales de las variables climáticas sigue una sistemática ordenada por variables, modelos, escenarios y periodo climático, según las combinaciones de los elementos representados en la *tabla 2*.

Modelo	Escenario	Periodo	Variable
AeMet	20C3M	1961-2000	T_MAX
			T_MIN
			PRC
ERA40			NDF
			NDC

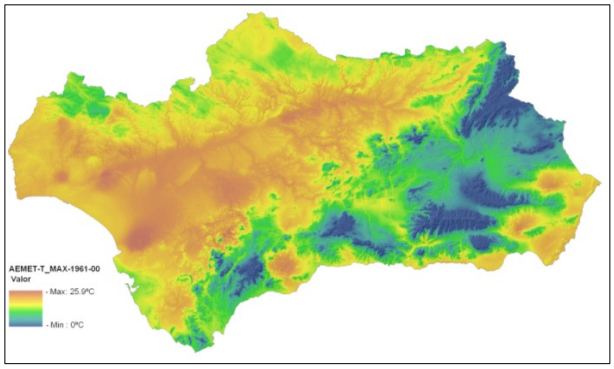

Tabla 2 e imagen 5. Combinación de Variables climáticas de1º Orden según datos observados y ERA40. La Imagen corresponde a la combinación de la tabla señalada en rojo:AeMer-20C3M-1961-2000-T_MAX.

Variable	Descripción
T_MAX	Temperatura máxima (anual y mensual)
T_MIN	Temperatura mínima (anual y mensual)
PRC	Precipitación acumulada (anual y mensual)
NDF	Número de días de helada (<= 0ºC)
NDCX	Número de días de calor anual (>= XºC)
NNT22	Número de noches con T_min >= 22ºC

Tabla 3 Descripción de las variables climáticas de 1º Orden.

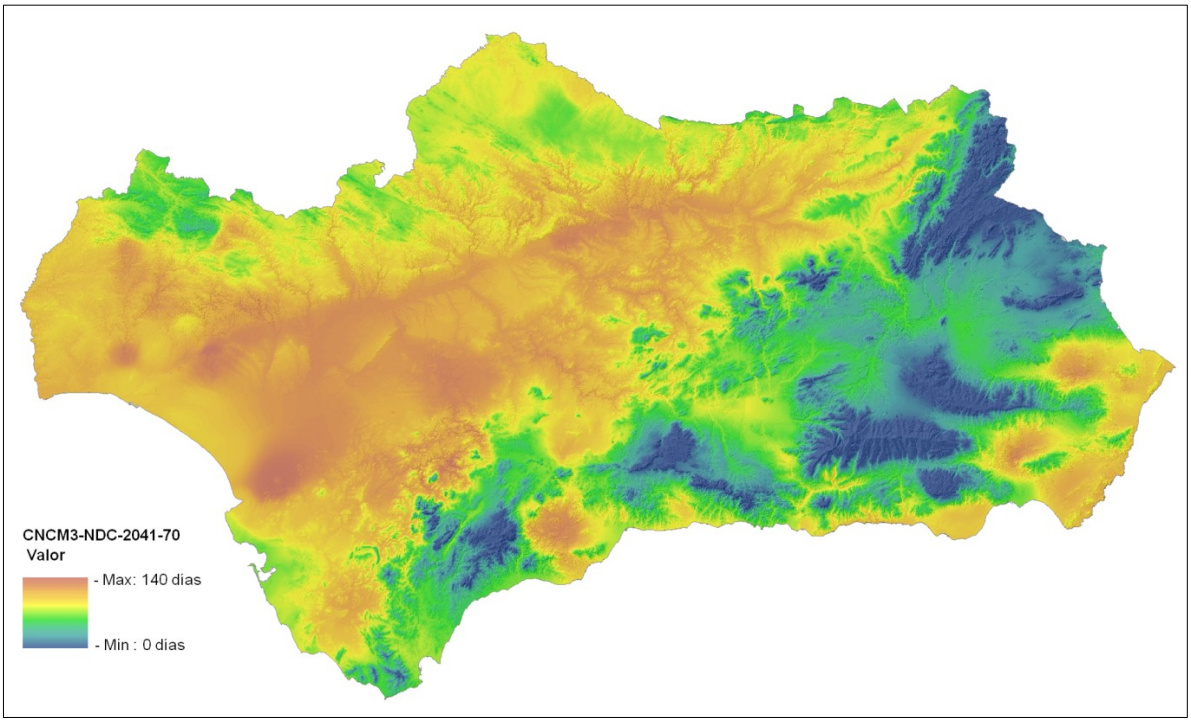

Tabla 4 e imagen 5. Combinación de Variables climáticas de 1º Orden según MCGs. La Imagen corresponde a la combinación de la tabla señalada en rojo: CNCM3-A1b-2041-70-NDC

Modelo	Escenario	Periodo	Variable
CNCM3	20C3M	1961-2000	T_MAX
BCM2	A1b	2011-2040	T_MIN
			PRC

Variable	Operación	donde:
T_MAX<m>	$\frac{\sum_{i=n}^{i=1} Tmax_i}{n}$	$Tmax_i$ = Temperatura máxima en el día i
T_MIN<m>	$\frac{\sum_{i=n}^{i=1} Tmin_i}{n}$	$Tmin_i$ = Temperatura máxima en el día i
PRC<m>	$\frac{\sum_{i=n}^{i=1} Prc_i}{n}$	Prc_i = Precipitación acumulada en el día i
NDCX	$\sum_{i=n}^{i=1} con\left(Tmax_i \geq X, 1, 0\right)_i$	$Tmax_i$ = Temperatura máxima en el día i
NDF	$\sum_{i=n}^{i=1} con\left(Tmin_i \leq 0, 1, 0\right)_i$	$Tmin_i$ = Temperatura máxima en el día i
		m = mes del año (1 a 12, 0 el anual), i = día , n = número de días

Tabla 5. Operación estadística de las variables climáticas de 1º Orden.

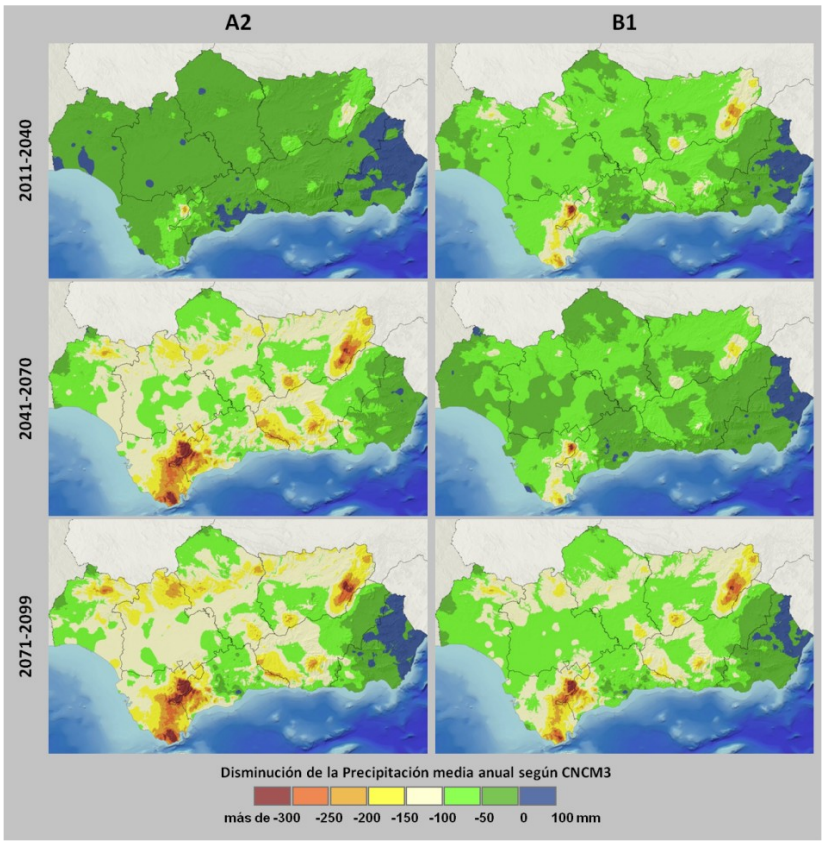

Imagen 6. Evolución de la Precipitación media anual para los escenarios RCP 45 y RCP 85 del MCG ESM1.

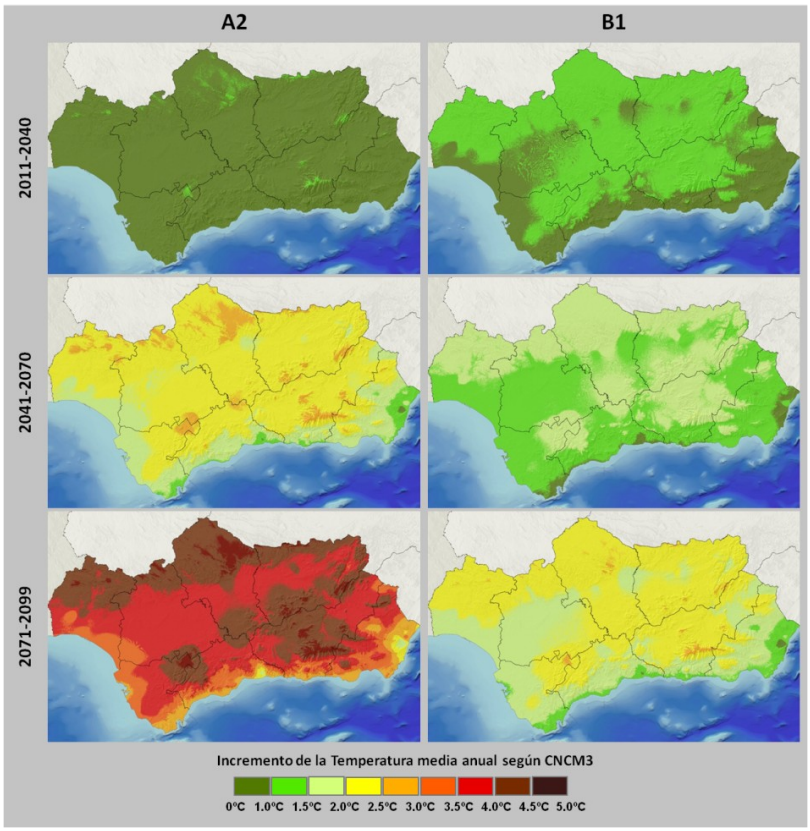

Imagen 7. Evolución de la temperatura media anual según los escenarios RCP 45 y RCP 85 del MCG ESM1.

ANEXO II.B. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS TERRITORIALES DE VARIABLES DE 2º Y 3º ORDEN

La elaboración de los *modelos territoriales de variables (climáticas o no) de 2 y 3º orden* se basan en fuentes de información territorial previamente elaboradas, entre ellas los modelos territoriales de variables climáticas de 1° orden, mediante la aplicación de métodos de análisis territorial raster.

Cada variable es calculada con el modelo de simulación territorial más adecuado a la disponibilidad de información. La proyección futura bajo los escenarios de cambio climático, va a permitir conocer la evolución espacial y temporal. Para ello son usados los modelos territoriales de las variables climáticas de primer orden obtenidas hasta el momento. No obstante, será frecuente el uso intemporal de algunas variables territoriales que se suponen constantes en la proyección, aún conociendo que éstas van a ser modificadas por el cambio climático, tales como la vegetación, el suelo, el viento, etc.

A continuación se describe punto a punto, las líneas generales de la metodología y fuentes de información a utilizar.

1. Integral Térmica sobre 7.5ºC

Como integral térmica se entiende como la suma acumulada de la temperatura, muy correlacionada con la evolución fenológica de diversidad de especies animales y vegetales. Es posible calcular dicha integral siempre que se supere un determinado umbral. En este caso la integral térmica es calculada con un umbral por encima de 7.5°C, temperatura sobre la cual la fotosíntesis es potencialmente activa.

2. Grados día refrigeración y calefacción

Variables correlacionadas con la energía necesaria para no superar o bajar de determinados umbrales de temperatura relacionadas con el confort climático humano. En este caso el calculo se ha realizado mediante la integral térmica sobre el umbral de 22°C o bajo el umbral de 16°C.

3. Precipitación de Nieve

La precipitación de nieve se define como el número de litros de agua en forma de nieve caídos en un metro cuadrado. El modelo de simulación calcula a partir de la precipitación media mensual y la temperatura media mensual, la cantidad de lluvia que precipitada cuando la temperatura es menor o igual a 0. El fenómeno es mucho más complejo, ya que dicha precipitación en forma de nieve se realiza en capas altas de la atmósfera, en otras condiciones diferentes a las terrestres. Su cálculo es una referencia aproximada para conocer su evolución en el tiempo, y por tanto su uso debe hacerse con cautela a la hora de estudiar sus efectos. El modelo puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$snow_0 = \sum_{m=12}^{m=1} con(Tmed_m \leq 0, Prc_m, 0)$$

Siendo *m* el número del mes (0 = anual); *Tmed* la temperatura media del mes *m*, Prc_m la precipitación acumulada del mes *m*.

La *imagen 8* corresponde a una línea temporal bajo RCP 26 de la simulación de este parámetro según ESM1.

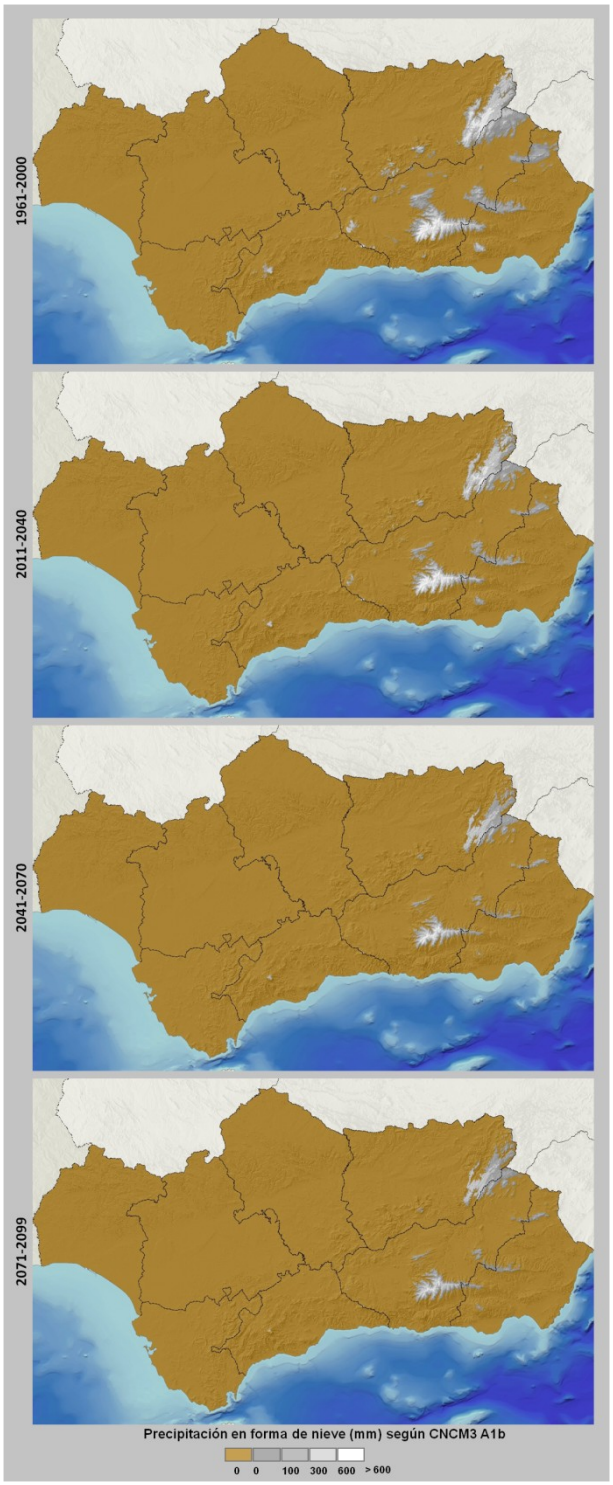

Imagen 8. Evolución de la precipitación de nieve según ESM1 y RCP 26.

4 Temperatura media

La temperatura media del mes *"i"* es calculada mediante la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima del mes *"i"* dividido por dos.

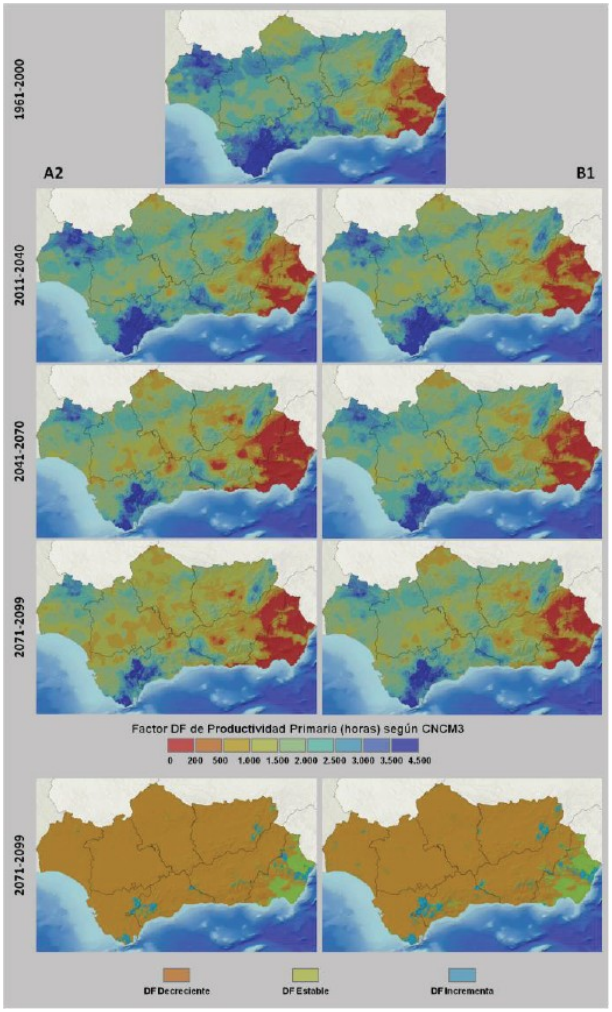

Imagen 9. Evolución del factor DF según ESM1.

5. Evapotranspiración de Referencia y Radiación Solar

La estimación del régimen hídrico de un hábitat es fundamental a la hora de reconocer su capacidad para albergar una especie, cultivo o comunidad vegetal. Para ello es preciso conocer no solo la precipitación del lugar, sino también las pérdidas potenciales de agua por evapotranspiración, las cuales a su vez dependen en gran medida de la radiación solar. El modelo *"FAO Penman Monteith56"* o *"Penman-Monteith FAO98"* es el método más preciso para calcular la evapotranspiración de referencia (*ETo).* Se trata de una función compleja y dependiente de multitud de variables, deducido a partir del modelo físico de conservación de energía, en el que están implicados todos los flujos de intercambio energético del interfaz suelo-atmósfera, entre ellos el cambio de estado del agua de líquido a vapor, ya sea directo por evaporación en el suelo o transpiración en las plantas.

La característica más sobresaliente del modelo *"Penman-Monteith FAO98"* para cálculo de la ETo es que se basa en principios de física clásica, una ventaja que además de hacerlo más consistente, robusto y con un amplio dominio de aplicación, también lo hace flexible a modificaciones particulares, si estas se realizan con una base física. Sin embargo, este modelo está formulado para lugares de relieve llano o suave, no adaptándose a buena parte de la región andaluza. Es por esta razón, que en este trabajo es asumida una adaptación de este modelo que considera la variación territorial y temporal de la radiación solar, gracias a un factor denominado "incidencia solar".

El modelo de Penman-Monteith FAO98 de la evapotranspiración de referencia ETo en un cultivo de 0.12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0.23 de albedo, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\mathrm{ETo} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot v_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot v_2)}$$

ETo: evapotranspiración de referencia en mm/día

Δ: pendiente de la curva de tensión de vapor saturado en KPa/ºC

R_n: radiación solar neta sobre la superficie del terreno en MJ/m2·día

G: flujo de calor hacia el suelo en MJ/m2·día

γ: constante psicrometría en kPa/ºC

T: temperatura media del aire en ºC

v_2: velocidad media del viento en m/s

e_a: presión de vapor actual en KPa

e_s: presión de vapor saturado en KPa

La radiación neta (Rn) en un relieve cualquiera con incidencia solar s_n, de albedo α y pendiente *p*, vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\mathrm{Rn} = (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{2 + \alpha \cdot (1 - \cos p)}{2}\right) \cdot R_s \cdot \frac{s_n}{sh_n \cdot \cos p} - R_{ol}$$

Donde s_n es la incidencia solar y incidencia solar normalizada sh_n.

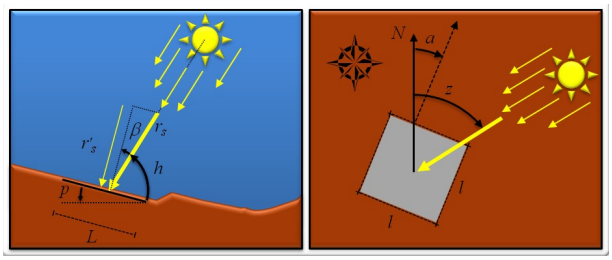

Imagen 10. Representación gráfica del modelo de incidencia solar. "Detección de Oasis Orográficos"

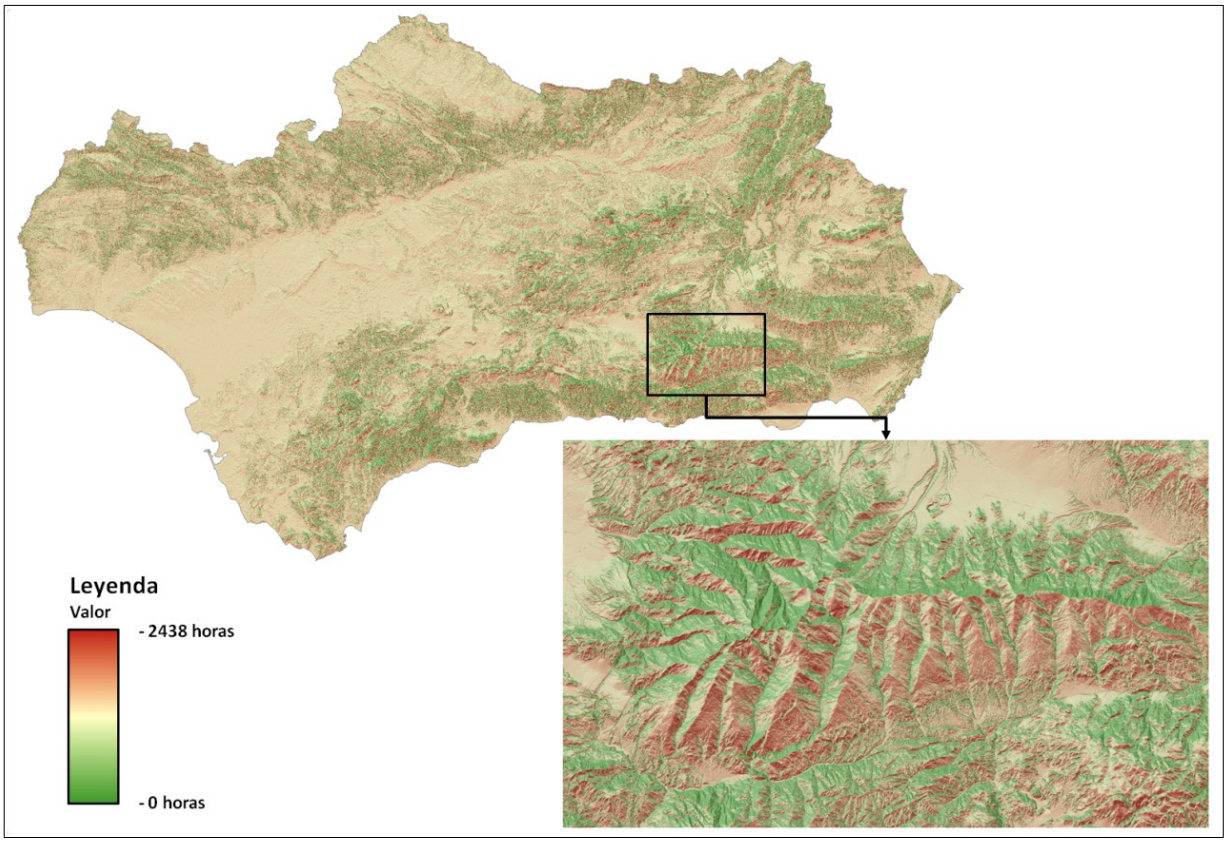

Imagen 11. Modelo Digital de Incidencia Solar Anual de Andalucía. El modelo de incidencia solar ha sido aplicado a la totalidad de la comunidad andaluza usando para ello el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de Andalucía de 10x10 metros generado a partir de vuelo fotogramétrico blanco y negro a escala 1:20.000 de 2001-02. Dicha aplicación se ha realizado para cada mes del año, obteniendo los correspondientes modelos rasters, donde cada pixel de 10 metros de resolución almacena la incidencia solar mensual en número de horas.

Este modelo se aplica bajo las condiciones de observación en el periodo 1961-2000, reanálisis con ERA40 y las proyecciones según todos los MCGs y escenarios considerados en este trabajo, obteniendo los modelos digitales de evapotranspiración de referencia y radiación solar de los ELCC.

6. Balance Hídrico

El balance hídrico mensual permite conocer la disponibilidad de agua mediante el cómputo de la precipitación y evapotranspiración. Modelos complejos de balance hídrico tienen en cuenta todos los factores implicados en la evolución de la humedad del suelo. Perdidas por escorrentía e interceptación, percolación, profundidad del suelo, capacidad de campo, flujo subsuperficial, etc. son factores que intervienen en la dinámica que determina este factor. Sin embargo, la metodología aquí usada asume un balance hídrico potencial y solo dependiente del clima, es decir solo considera ganancias a la precipitación y pérdidas a la evapotranspiración. El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$BH_m = con(BH_{m-1} + P_m - Eto_m \geq 0, BH_{m-1} + P_m - Eto_m, 0)$$

Donde BH_m es el balance hídrico del mes m , P_m y ETo_m y la evapotranspiración de referencia del mes m, y BH_{m-1} el balance hídrico del mes anterior. El computo se realiza durante el año hidrológico comenzando por el mes de septiembre y considerando que en el mes de agosto se ha agotado el agua. Esta última es una simplificación que no se cumple en todos los lugares de Andalucía.

El balance hídrico anual se suele considerar como la disponibilidad media anual de agua y que se calcula como la media del balance hídrico. A partir de esta variable climática es posible inferir multitud de nuevos parámetros muy interesantes como la duración de la sequía:

$$DSQ = \sum_{12}^{m=1} con(BH_m = 0,1,0)$$

o disponibilidad mensual de agua:

$$DA = BH_m + P_m$$

índice de aridez corregido:

$$IAc = \frac{BH_m + P_m}{Eto}$$

evapotranspiración real:

$$Etr = con(BH_{m-1} + P_m - Eto_m \geq 0, Eto_m, P_m)$$

No son los únicos, solo los mas sencillos de calcular, ya que el balance hídrico interviene en multitud de fenómenos relacionados con la producción primaria y ciclo hidrológico. Todos ellos son generados para completar los ELCC.

A continuación se describe un factor relacionado con el balance hídrico e íntimamente ligado a la producción primaria, como es el factor DF.

7. Factor DF. Disponibilidad neta anual de tiempo para la función fotosintética.

El cambio climático va a traer consigo alteraciones de la productividad primaria. *A priori* no es posible conocer si esta alteración va a conducir a un aumento de la producción o su merma, ya que mientras el incremento de la temperatura puede mejorar la capacidad productiva de las plantas, la disminución de la precipitación y aumento de la evapotranspiración pueden reducirla. Por otra parte, en las condiciones del clima que influyen en el crecimiento vegetal también participa el solapamiento de sucesos meteorológicos, dado que para que se de un entorno apropiado para la puesta en marcha de la producción fotosintética, las plantas requieren en el mismo instante, luz, agua y una temperatura ambiente mayor de 7.5°C[1]. Esto es debido a que las enzimas que controlan la fotosíntesis son activas entre los 7.5 y 40°C de temperatura. En el otro extremo, si la radiación solar sobre las hojas es excesiva, la fotosíntesis deja de ser eficiente o se desactiva si es mayor de 40°C, por lo que las plantas deben estar transpirando para aligerar energía mediante el calor latente de vaporización. Por último, el fotoperiodo

1 Las denominadas plantas CAM han sido capaces de disociar la fotosíntesis en dos partes, la segunda nocturna para evitar el recalentamiento y pérdida de agua durante el día.

define el número de horas de luz que llega a la superficie terrestre y, por tanto, el tiempo que dispone la planta para producir si el resto de condiciones le es apropiada.

Por consiguiente, e independientemente de las características edafológicas o cualquier otro factor no climático capaz de alterar el hábitat de una especie vegetal, el clima interfiere directamente sobre la productividad vegetal mediante el régimen combinado de fotoperiodo, temperaturas, precipitaciones y evapotranspiración, entendiendo que esta última incluye otros factores climáticos como humedad relativa, viento, radiación solar, etc. Estos factores deben actuar combinadamente en el tiempo, ya que un hábitat sometido a equivalentes valores medios de temperatura y precipitación anual, puede tener una respuesta muy diferente según como sea la distribución interanual de ambas. De esta forma, si la época de lluvias de un clima concurre con la época de más frio, la productividad será mucho menor si la misma coincide con un periodo más suave de temperaturas. Esto también influye en la eficiencia de cada biotipo, ya que estructuras vegetales capaces de explorar el subsuelo que almacena el agua acumulada en invierno, van a tener una ventaja sobre las herbáceas que van a depender de las lluvias recientes.

Asímismo, ciertas condiciones climáticas pueden restringir un hábitat por constituir un limitante, o extremo insuperable para ciertas formas vitales de vegetales, tal como puede ocurrir cuando existe un periodo estival demasiado largo, heladas, inundaciones, aludes, etc. Sin ser condiciones extremas, otras combinaciones pueden causar efectos de manera diferida sobre las plantas como ocurre con los ciclos de años secos en el mediterráneo. Así por ejemplo, es conocido que las sequías más acusadas tienen consecuencias sobre el estrato arbóreo varios años después.

En áreas de montaña es de esperar que el cambio climático eleve el cinturón más productivo, dejando expuestos ciertos ecosistemas a un estrés hídrico y productivo, y abriendo la oportunidad a otros más elevados. Esta evolución previsible choca con los litosoles o suelos poco evolucionados que encontramos en cotas altas. Conocer cuánto va a deslocalizarse este centroide productivo es una de las cuestiones más importantes que debemos responder para gestionar correctamente el efecto del cambio climático sobre las masas forestales de montaña.

Para estudiar adecuadamente lo descrito en este punto, se suele recurrir a variables que integran varios factores climáticos simultáneos. El factor DF, o *disponibilidad neta anual de tiempo para la función fotosintética*, es un factor que puede dar mucha luz a la evolución de la productividad primaria.

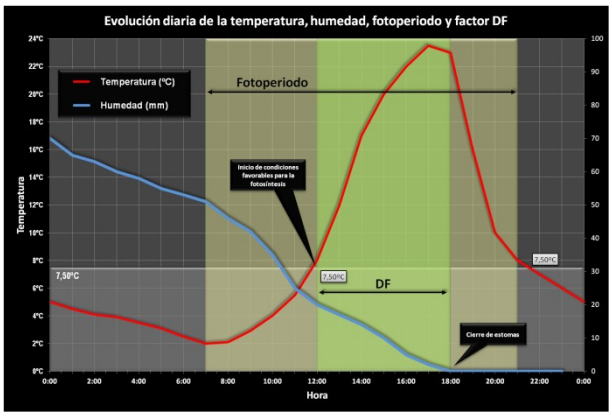

Imagen 12. Gráfico explicativo para el cálculo del factor DF.

El factor DF se define como el número de horas de luz solar, anual, mensual o diaria, donde simultáneamente se dan las condiciones apropiadas para poner en marcha la fotosíntesis. Como hemos comentado anteriormente, la fotosíntesis en la hoja de una planta es factible cuando tenemos luz solar, la temperatura se encuentra entre los 7.5° y los 40°C y no existe estrés hídrico (*imagen 12*). En un día particular el factor DF puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$DF = \sum_{n=H}^{n=h} con(T \geq 7.5 \; and \; BH > 0{,}1{,}0)$$

Donde T es la temperatura, BH es el balance hídrico en el suelo, h hora a la que amanece y H hora a la que atardece.

Para calcular el factor *DF* mensual y anual el procedimiento se simplifica tomando un día medio con las condiciones de temperatura mínima y máxima situadas en los extremos del fotoperiodo, y balance hídrico según las medias mensuales de los modelos digitales correspondientes. De esta manera y según el *imagen 13*, el factor DF para un mes cualquiera se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\mathrm{DF_m} = con\left(BH_m > 0, con\left(\mathrm{Tmax_m} < 7.5, 0, \mathrm{Tmin_m} > 7.5, N \cdot fp, N \cdot fp \cdot \frac{(\mathrm{Tmax_m} - 7.5)}{(\mathrm{Tmax_m} - \mathrm{Tmin_m})}\right), 0\right)$$

Donde $Tmin_m$ $Tmax_m$ y BH_m son la temperatura mínima, máxima y balance hídrico respectivamente, fp_m el número de horas medio de luz, todos del mes *m* con *N* días.

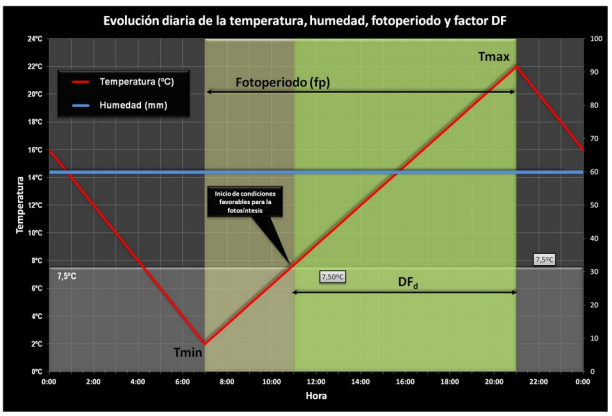

Imagen 13. Gráfico explicativo para el cálculo del factor DF mensual

Es muy importante volver a recordar que el factor DF es un valor potencial de productividad que no considera limitantes edáficos, ni climáticos de otro tipo que no sean la temperatura, precipitación y evapotranspiración. Es expresado en horas, y su máximo no puede ser mayor de 4.380 h. Como se puede entender no es aplicable para cultivos en regadío ni ecosistemas azonales.

La imagen 14 facilita los resultados de la evolución del factor DF según MIROC en el escenario rcp85. Como se adelantaba al principio de este punto, el cambio climático tendrá efectos contrapuestos en esta variable, debido a la mejora de las condiciones de la temperatura para la planta en las zonas frías y perjuicio por la pérdida de precipitación y aumento de la evapotranspiración. Sin embargo, la disminución de la productividad será la tónica generalizada de toda Andalucía como puede observarse en esta figura, quedando estable en algunas zonas como el este de Almería. Como cabía esperar, las zonas de alta montaña experimentaran un aumento de la productividad primaria, dado que, y a pesar de la disminución de la precipitación, las temperaturas más suaves y prolongadas por más tiempo permitirán a la vegetación mayor margen de producción.

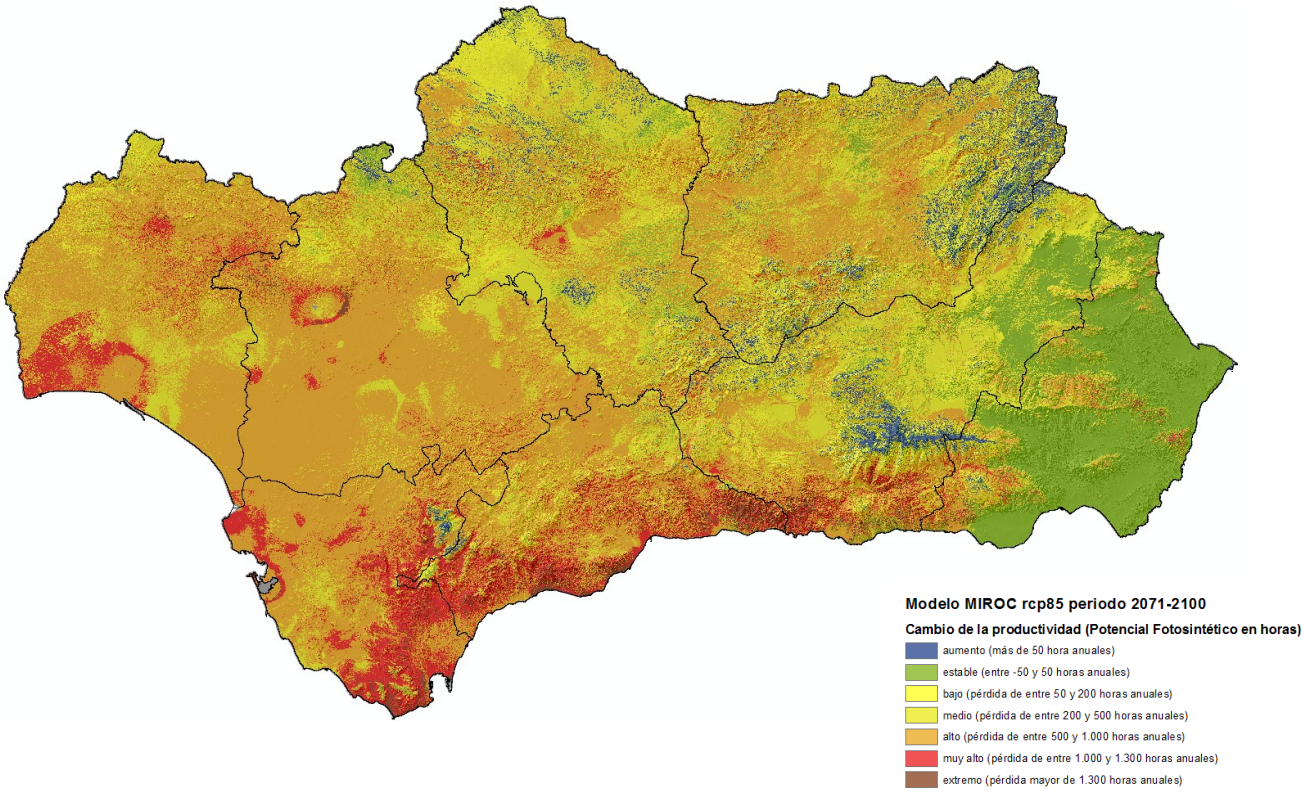

Imagen 14. Distribución de la variación de la productividad según MIROC para el escenario rcp85 en el periodo 2071-2100

8. Variables bioclimáticas

En este proyecto se ha abordado también la proyección a lo largo del presente siglo de las variables climáticas más usuales para estudiar el bioclima de una región. Desde el punto de vista del régimen hídrico, la suma de superávits (SS) y la suma de déficits (SD) de agua suelen ser usados para la definición de bioclimas o el estudio de la distribución potencial de especies vegetales.

Los modelos han sido calculados mediante las siguientes expresiones:

$$SS = \sum_{12}^{m=1} con(P_m - Etr_m > 0, P_m - Etr_m, 0)$$

$$SD = \sum_{12}^{m=1} con(P_m - Etr_m < 0, Etr_m - P_m, 0)$$

El *índice de aridez* (Ia) expresa la relación entre la precipitación y evapotranspiración de referencia:

$$Ia = \frac{P}{Etr}$$

La duración de la sequía ya ha sido descrita en el apartado dedicado al balance hídrico, mientras que la intensidad de la sequía (IS) viene a complementarla expresando la magnitud de esta, mediante la siguiente expresión:

$$IS = \sum_{12}^{m=1} \mathrm{con}(\mathrm{P_m} - Tmed_\mathrm{m} < 0, \mathrm{P_m} - Tmed_\mathrm{m}, 0)$$

Mientras que el Índice de Hídrico Anual (IH) e Índice de Humedad Anual (IHA) vienen expresados como:

$$IH = \frac{100 \cdot SS - 60 \cdot SD}{ET_o}$$

$$IHA = 100\ x \frac{\mathrm{Prc} - \mathrm{ETo}}{ETo}$$

9. Indices Térmicos.

Como indices térmicos se considerarán las siguientes variables relacionadas con la distribución anual de las temperaturas:

Índice de Continentalidad Compensado (ICC):

$$ICC = Tmax - Tmin + 0.006 \cdot MDE$$

Donde *Tmax* es la temperatura máxima anual, *Tmin* la temperatura mínima anual y *MDE* la altitud.

Índice de Termicidad (Ixt) es un valor que pondera la intensidad del frío, factor limitante para muchas plantas y comunidades vegetales. Es la suma en décimas de grado de *T* (temperatura media anual), *m* (temperatura media de las mínimas del mes más frío) y *M* (temperatura media de las máximas del mes más frío).

$$Ixt = 10 \cdot (T + m + M)$$

Índice de Termicidad Compensado (Itc))Salvador Rivas-Martínez (Versión 27-08-2004)

En las zonas extratropicales de la Tierra (al norte y al sur del paralelo 23° N y S), el índice de termicidad compensado (Itc) trata de ponderar el valor del índice de termicidad (It), debido al "exceso" de frío o de templanza que acaece durante la estación fría en los territorios de clima continental o hiperoceánico acusado en la Tierra, para que su continentalidad pueda ser comparable.

Si el índice de continentalidad simple (Ic) está comprendido entre 8 y 18, el valor del Itc se considera igual al del It (It = Itc). Por el contrario, si el índice de continentalidad no alcanza o supera los valores mencionados, hay que compensar el índice de termicidad adicionando o sustrayendo un valor de compensación (C). Itc = It ± C.

En las zonas extratropicales acusadamente hiperoceánicas (Ic < 8.0), el valor de compensación (C0) se calcula multiplicando por diez el resultado de la sustracción entre 8.0 y el Ic de la estación: C0 = (8.0 - Ic) 10. Este valor (C0) se resta del índice de termicidad: Itc = It - C0.

En los climas extratropicales continentales o semicontinentales (Ic > 18.0), el valor de compensación (C) se suma al índice de termicidad: Itc = It + Ci.. Este valor de compensación se calcula según sea la cifra del índice de continentalidad simple (Ic). Así, cuando la continentalidad es moderada (18.0 < Ic <= 21.0), el valor de compensación (C1) se obtiene multiplicando por f1 (f1 = 5) el resultado de la sustracción entre el Ic de la estación y 18. Cuando la continentalidad es acusada (Ic > 21.0), el valor de compensación se calcula mediante un sumatorio cuyos valores parciales (C1, C2, C3, C4) son proporcionalmente mayores debido al incremento del factor multiplicador (fi) en función del aumento de la continentalidad. Por lo tanto: Itc = It + (C1 + C2 + C3 + C4).

Los valores de compensación en función del índice de continentalidad simple (Ic) y del factor corrector progresivo de la continentalidad (fi) se obtienen de la forma que se expone en la tabla siguiente.

Cálculo de los valores de compensación para la obtención del Índice de termicidad compensado (Itc)			
Ic	***fi***	***Ci***	***valor máximo***
Ic<=8	f0=10	C1=C0; C0=f0 (Ic - 8)	C0 = - 80
18<Ic<=21	f1=5	Ci=C1; C1=f1 (Ic - 18)	C1 = + 15
21< Ic<=28	f2=15	Ci=C1 + C2; C1=f1 (21 - 18)=15; C2=f2 (Ic - 21)	C2 = + 105
28<Ic<=46	f3=25	Ci=C1 + C2 + C3; C1=15; C2=f2 (28 - 21)=105; C3=f3 (Ic - 28)	C3 = + 450
46<Ic<=65	f4=30	Ci=C1 + C2 + C3 + C4; C1=15; C2=105; C3=f3 (46 - 28)=450; C4=f4 (Ic - 46)	C4 = + 570

En la práctica, en los territorios extratropicales de la Tierra (> 23° N & S) con un Índice de continentalidad >= 21, así como en todas aquellas localidades con un It o Itc < 120, para el cálculo del termotipo del piso bioclimático se utiliza el valor de la temperatura positiva (Tp).

Fuente: http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm.

Oscilación Térmica

$$\mathrm{Osc} = Tmax - Tmin$$

Donde Tmax y Tmin son las Temperaturas Media del mes más Cálido y Temperatura Media del mes más Frio, respectivamente.

Temperatura Media de las mínimas del mes más frio: temperatura media de la media de las temperaturas mínimas del mes con menor temperatura.

Temperatura Media de las máximas del mes más cálido: temperatura media de la media de las temperaturas máximas del mes con mayor temperatura.

Oscilación Térmica Total

$$\mathrm{Osct} = tmmc - tmmf$$

Donde tmmc y tmmf son las Temperatura Media de las mínimas del mes más frio y Temperatura Media de las máximas del mes más cálido, respectivamente.

Índice Ombrotérmico anual (Io) según Salvador Rivas-Martínez (Versión 27-08-2004)

Es el cociente entre la suma de la precipitación media en mm de los meses cuya temperatura media es superior a cero grados centígrados (Pp) y la suma de las temperaturas medias mensuales superiores a cero grados centígrados en décimas de grado(Tp).

$$Io = 10 \times Pp / Tp.$$

Los tipos ombrotérmicos anuales se resumen en la siguiente tabla

Io	*Ios2*	*Ios3*	*Ios4*
2.0-2.8	> 1.9	> 1.9	> 2.0
2.8-3.6	> 1.8	> 1.9	> 2.0
3.6-4.8	> 1.7	> 1.9	> 2.0
4.8-6.0	> 1.5	> 1.8	> 2.0
6.0-9.0	> 1.3	> 1.8	> 2.0
9.0-12.0	> 0.7	> 1.4	> 2.0
> 12.0	> 0.1	> 0.3	> 2.0

Tabla de compensación. Intervalos de los valores de los índices ombrotérmicos anuales (Io) que, en función de los valores de los índices ombrotérmicos estivales (Ios2, Ios3), pueden compensarse y pasar del macrobioclima mediterráneo al templado (variante submediterránea).

Fuente: http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm.

10. Confort Climático Humano por Fanger

De los métodos que pretenden evaluar en qué medida se alcanza el confort térmico en una determinada situación en función de diversidad de variables ambientales, es el modelo de P.O. **Fanger** (Thermal Confort, McGraw-Hill, 1973) el que contempla mayor número de parámetros en una metodología que combina una formulación física basada en un balance energético y otra probabilista en función de la respuesta de la población a un determinado ambiente. El método de Fanger considera el nivel de actividad, las características de la ropa, la temperatura seca, la humedad relativa, la temperatura radiante media, la velocidad del aire entre otros factores. Todas estas variables influyen en los intercambios térmicos hombre-entorno, afectando a la sensación de confort.

El método de Fanger, en la actualidad uno de los más extendidos para la estimación del confort térmico, calcula dos índices denominados **Voto medio estimado** *(PMV-predicted mean vote*) y **Porcentaje de personas insatisfechas** (*PPD-predicted percentage dissatisfied*), que indican la sensación térmica media de un entorno y el porcentaje de personas que se sentirán inconfortables en un ambiente determinado. Esto resulta de gran interés no sólo cuando se trata de evaluar una situación sino cuando se pretende proyectar o modificar un ambiente térmico. La importancia y aplicación generalizada del método queda patente en su inclusión como parte de la norma ISO 7730 relativa a la evaluación del ambiente térmico (Diego-Mas, Jose Antonio. Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015. **[consulta 14-07-2020].online**:http://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php).

El Voto medio estimado es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto a una situación dada en una escala de sensación térmica de 7 niveles (frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente caluroso, caluroso, muy caluroso), basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano (la diferencia entre la producción interna de calor del cuerpo y su pérdida hacia el ambiente).

El Voto medio estimado predice el valor medio de la sensación térmica, no obstante, los votos individuales se distribuirán alrededor de dicho valor medio, por lo que resulta útil estimar el Porcentaje de personas insatisfechas por notar demasiado frío o calor, es decir aquellas personas que considerarían la sensación térmica provocada por el entorno como desagradable.

11. Distribución Potencial de Especies Vegetales

Para la distribución potencial de una especie vegetal se ha optado por una metodología basada en una caracterización paramétrica de los biotopos ocupados por parcelas de control donde se sabe que prospera la especie estudiada, para después realizar una extrapolación de lo observado al resto del territorio. Numerosas son las monografías y artículos basados en la metodología de la autoecología paramétrica (GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994, GÓMEZ, et al. 2002, GANDULLO, et al. 2004a, 2004b, SÁNCHEZ PALOMARES, et al. 2007, 2008, ALONSO PONCE, et al. 2010)[2]. En estas publicaciones son definidas las variables ecológicas cuya caracterización delimita correctamente la estación de la especie, así como el método operativo generalizado que permite acotar los intervalos óptimos y marginales de las variables.

El fundamento de esta metodología, consiste en determinar, en una red representativa de parcelas de la especie en estudio, los valores de los parámetros de la estación ecológica. Dada una distribución de los valores de una variable cualquiera, el método define como intervalos marginales máximo y mínimo (LIi-UIi, LSi-USi), a los definidos por los cuantiles que recogen el 10% de las parcelas a uno y otro lado de la distribución, extramarginales los que se encuentran fuera del rango (menor que LIi, mayor que LSi), y el intervalo óptimo como el definido por el cuantil central de la distribución u 80% del área central (UIi-USi). La distribución óptima de la especie quedaría definida por el área en donde todas las variables ecológicas consideradas son óptimas, mientras que la potencial seria la definida por el área con un número determinado de variables ecológicas óptimas.

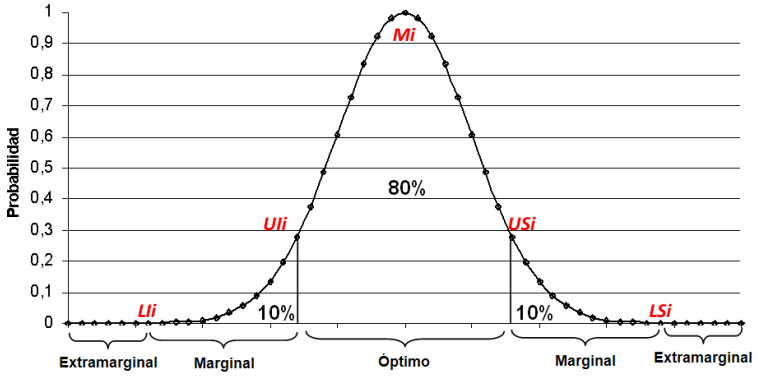

Imagen 15 Clasificación de los intervalos de una variable ecológica.

Para realizar la aplicación de esta metodología es necesario diseñar un programa SIG específico basado en análisis raster, que permite poner en marcha dicho método, de manera fiel, flexible y rápida. Las variables ecológicas introducidas en este programa son las 26 especificadas seguidamente.

id	var	var nombre
1	slp	Pendiente
2	s	Insidencia Solar de Noviembre
3	prc	Precipitacion de Total
4	pin	Precipitacion de Invierno
5	ppr	Precipitacion de Primavera
6	pot	Precipitacion de Otoño
7	t_med	Temperatura Media Anual

2 Ver al final del Anexo

id	var	var nombre
8	eto	Eto Total
9	sup	Suma de Superavits
10	def	Suma de Deficits
11	ihd	Indice Hidrico Anual
12	tmc	Temp media del mes mas calido
13	tmf	Temp media del mes mas frio
14	osc	Oscilacion Termica media
15	tmmc	Media de las MX del mes mas calido
16	tmmf	Media de las MM del mes mas frio
17	ost	Oscilacion Termica Total
18	bh	Balance Hidrico
19	bhp	Meses con Balance Hidrico +
20	pf	Potencial Fotosintetico
21	are	Arena
22	arc	Arcilla
23	crad	Capacidad de Retencion de Agua
24	ca	Caliza Activa
25	ph	pH
26	cic	Capacidad de Intercambio Cationico

Por otro lado, se ha calculado un Índice de Potencialidad a partir de la metodología publicada por primera vez por SÁNCHEZ PALOMARES et al. (2004) y desarrollada en trabajos posteriores.

El proceso metodológico anterior, es la base para poder evaluar la aptitud de una estación en relación con la mayor o menor posibilidad de éxito a la hora de realizar una introducción o restauración de una especie forestal. Por tanto, este índice surge como la necesidad de expresar esta aptitud mediante un indicador numérico, función de la posición en que el valor del parámetro se sitúa dentro de los tramos centrales o marginales definidos, de la forma siguiente:

Dada una estación determinada, para el parámetro i, conocemos los valores que definen los hábitats: Lli, Uli, Mi (valor medio), USi y LSi. Para un valor del parámetro xi el índice de aptitud pi toma los siguientes valores:

- pi igual a 1 si xi es igual a Mi.
- pi proporcional a la distancia (xi - Mi) e inferior a 1 mientras nos encontremos en el intervalo (Uli, Usi).
- pi disminuyendo linealmente desde el valor que toma en Uli hasta alcanzar el valor cero en Lli y, análogamente, entre USi y LSi.

Es decir:

- Para el intervalo (Uli, USi): pi = 1 – (|Mi - xi| / (USi - Uli))
- Para el intervalo (Lli, Uli): pi = (USi - Mi)(xi - Lli) / ((USi - Uli)(Uli – Lii))
- Para el intervalo (USi, LSi): pi = (Mi - Uli)(LSi - xi)/((USi - Uli)(LSi – Usi))
- Para cualquier valor fuera de (Lli, LSi): pi = 0

Para el conjunto de todos los parámetros, definimos el indicador final (indicador de potencialialidad - IPot) como el producto de todos los índices de aptitud obtenidos de manera individual para cada parámetro, de forma análoga a como se definen otros índices factoriales (índices de fertilidad, de productividad, etc.).

Con objeto de hacer más manejables los resultados y con vistas a establecer una serie de clases, mostramos el valor numérico del indicador de potencialidad como el logaritmo decimal del producto de los índices de aptitud, multiplicados éstos por 10^4, dividiendo el resultado final por el número de parámetros considerados (NP=34), siempre que todos los índices de aptitud de cada parámetro sean mayores que cero. Si alguno de ellos tomase ese valor, se situaría fuera del intervalo definido entre los límites inferior y superior y, por consiguiente, de acuerdo con lo establecido anteriormente, estaríamos en el hábitat extramarginal, no procediendo valoración de aptitud alguna.

Es decir:

$$Ipot = \frac{1}{NP} log\left(p_1 10^4 \cdot p_2 10^4 \cdots p_{NP} 10^4\right)$$

o, lo que es lo mismo,

$$Ipot = 4 + \frac{1}{NP} log\left(p_1 \cdot p_2 \cdots p_{NP}\right)$$

De esta forma el valor de IPot varía desde prácticamente cero hasta 4, independiente del número de parámetros utilizados.

12. Unidades Bioclimáticas

Las Unidades "Bioclimas de Andalucia" tienen como objetivo principal realizar una zonificación climática de la región andaluza a escala de semidetalle, atendiendo a criterios fitoclimáticos.

Desde un punto de vista conceptual y abstracto, la delimitación de una región en clases a partir de las variables numéricas que a priori la definen, es lo que se denomina zonificación por clasificación de un conjunto de datos numérico para crear un conjunto de datos discreto. En este proceso quedan resumidos los datos de partida con una distribución difusa y sin fronteras, en grupos uniformes de semejantes características. Desde el punto de vista matemático, el problema consiste en realizar una agrupación de datos numéricos distribuidos en un espacio multidimensional, donde cada dimensión corresponde a una de las variables que van a definir la clasificación, en grupos discretos que representan cada uno de los nichos o espacios multidimensionales que la delimitan (Imagen 16). Este tipo de problemas se resuelven en geoestadística con los denominados métodos de clasificación de superficies (o imágenes), donde cada superficie corresponde a la distribución territorial de una variable continua.

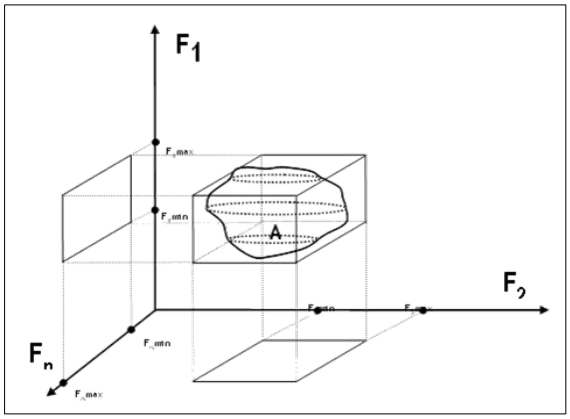

Imagen 16. Representación en tres dimensiones de la clasificación de datos numéricos en conjunto de grupos de semejantes características.

Existen dos grandes grupos de metodologías de clasificación de superficies, como son los "métodos de clasificación supervisada" y los"**métodos de clasificación no supervisada"**. En la primera se requiere una clasificación a priori definida por el ojo experto o una clasificación previa objetivo, a partir de la cual es inferida una clasificación generalizada sobre el resto de datos. El "análisis discriminante" es un buen ejemplo de clasificación supervisada, usada frecuentemente en análisis de imágenes satélite para la estimación de los grados de afectación de un incendio forestal, o la delimitación de unidades de vegetación. Mientras, los métodos de clasificación no supervisados no requieren una clasificación previa, solo el número de clases en los que van a agruparse los datos. Casi todas las clasificaciones sean o no supervisadas están basadas en la reconstrucción de funciones de probabilidad de pertenecer o no a un grupo o clase (Imagen 17).

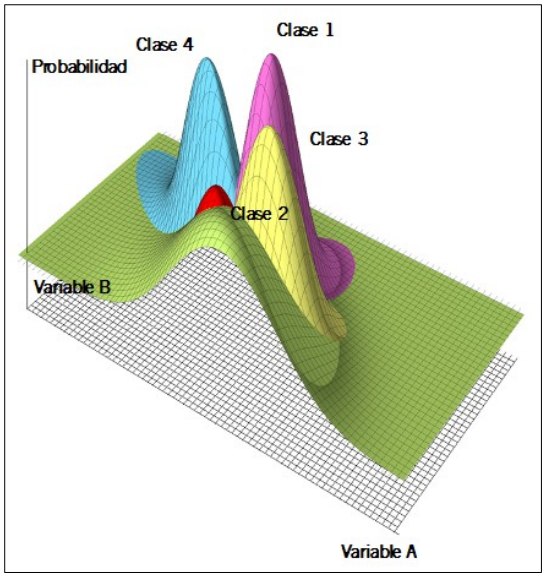

Imagen 17. Representación en un espacio bidimensional de la probabilidad de pertenecer o no a una clase u otra representada por las superficies de probabilidad diferenciadas por colores. El eje Z corresponde a la probabilidad, mientras que X e Y representan las variables continuas.

La metodología a utilizar en este trabajo corresponde a las de clasificación no supervisada cuyo diseño está basado en las premisas siguientes:

- La metodología debe ser reproducible en otros ámbitos espaciales independientemente de las condiciones fitoclimáticas, así como programable en rutinas autónomas, ya que debe estar sometida a multitud de proyecciones temporales bajo escenarios de cambio climático sin ningún tipo de supervisión. En estas condiciones el ojo experto solo debe interpretar los resultados o ajustarlo en el caso de no ser satisfactorios al final de cada proceso.

- La metodología debe basarse en variables numéricas continuas o superficies que representen algún tipo de distribución espacial de un factor climático concreto durante un periodo entre 30 y 40 años.

- Dichas variables deben basarse en criterios fitológicos que expresen de una manera directa y universal un factor en autoecología vegetal, tales como balance de humedad en el suelo y temperatura en el umbral de la fotosíntesis. Deben ser directos y universales con el fin de poder ser proyectadas bajo escenarios de cambio climático, evitando aquellas indirectamente correlacionadas con el clima, como la altitud.

- Así mismo, estas variables deben recoger los factores ecológicos con una distribución de datos tanto central como extrema, con el fin considerar criterios como el principio de "Liebig o factor limitante". De esta manera es muy importante combinar estadísticos como la media de la temperatura, con días de heladas, así como precipitación media anual combinado con periodos continuos sin lluvia.

- En todo lo posible las variables fitoclimaticas deben estar expresadas por el valor integral de varios parámetros climáticos con el importante propósito de simular el efecto anulador o multiplicador de onda característico de un ciclo climático interanual. Por ejemplo, el crecimiento de un vegetal solo es posible si simultáneamente la temperatura ambiente y humedad del suelo son las correctas. Cuanto mayor sea el acoplamiento de las fases temporales de ambos parámetros mayor será el crecimiento. En este hecho también puede contemplarse el grado de continuidad ininterrumpida de este acoplamiento, ya que según el caso, la estrategia de las diferentes especies puede ser muy diferente (distinción entre bosque esclerófitos y caducifólios por ejemplo).

- La clasificación climática debe ser independiente en todo lo posible de factores edáficos, hidrológicos o relacionados con las comunidades vegetales. De esta forma, variables como el balance hídrico, consideran un suelo no limitante a la hora infiltrar o almacenar el agua de lluvia. Sin embargo, si se ha considerado el relieve no solo en la modulación de la temperatura y precipitación, sino también en la transformación de la distribución de la radiación solar, con lo que se puede decir que esta metodología es capaz de detectar microclimas especiales.

- La metodología debe permitir que el sencillo cambio de las variables fitoclimaticas de un periodo histórico por otras proyectadas en un periodo futuro bajo escenarios de cambio climático, equivalga a la proyección de la zonificación bajo escenarios de cambio climático.

- La distribución de bioclimas a diferentes escalas debe ser una consecuencia de la escala de las variables fitoclimaticas con las que ha sido creada y el grado de agrupación de las clases iniciales con las que se define la agrupación de datos.

El procedimiento usado para la clasificación y discriminación de áreas bioclimaticamente homogéneas es denominado como "método de clasificación isoclaster". Isoclaster también conocido como "técnica de migración de medias", es un algoritmo de agrupación de datos no supervisado, que de manera iterativa agrupa valores o vectores en clases naturales caracterizadas por concentrarse alrededor de un centroide con una distancia mínima en el espacio multidimensional de las variables que definen la clasificación.

No existe ningún tipo de supervisión intermedio durante el proceso, sin embargo, es muy importante analizar los resultados obtenidos tras probar diferentes combinaciones de variables y parámetros de entrada del algoritmo, con el fin de que estos se ajusten a los resultados esperados por el experto, y sean coherentes con otras clasificaciones climáticas, distribución de vegetación potencial y real, cultivos, paisajes, pisos bioclimáticos, etc.

Como cabe esperar, las variables usadas y su número son determinantes para obtener unos u otros resultados, mientras que en segundo lugar de importancia, es el número de clases el parámetro con mas peso para obtener una delimitación que cuadre con la distribución de climas esperados. Siempre existe en una clasificación de este tipo, unidades ancla con mucho peso, y que por su carácter robusto y especial aparecen una y otra vez en los resultados obtenidos con muy poca variación, como ocurre con el Clima Mediterráneo Continental en zonas de Montaña y Altiplano de Andalucía occidental, o Clima Mediterráneo Subdesértico de Almería . Los criterios usados para escoger variables y definir el número de clases han seguido los pasos facilitados al principio del punto dedicado a la metodología. La solución final adoptada se concretará y argumentara en puntos posteriores.

Por otro lado, es conveniente y así se ha llevado acabo, la correcta normalización de las variables con el fin de realizar un tratamiento equilibrado de los datos de cada una de las capas de información, que sea cual sea su dimensión deben equipararse en orden de magnitud. De esta forma, cada variable elegida ha sufrido una transformación lineal para obtener un rango de valores entre 0 y 1.000.

Existen otros parámetros a los que es muy importante atender, pero que son propios de la correcta aplicación del algoritmo, como son número de iteraciones, dimensión mínima de la clase o el intervalo de muestreo. El número de iteraciones no debe ser un limitante a la hora de poner una magnitud que afine la convergencia al resultado correcto, y solo implica un mayor o menor tiempo de procesamiento. Sí es importante definir una dimensión de datos mínima de cada clase e intervalo de muestreo, ya que el resultado de la clasificación es un fichero estadístico con las firmas de las variables definidas por su vector de medias y matriz de covarianzas, el cual debe atender, para su correcta aplicación, a una población representativa por cada clase. Si esta es muy pequeña, la zonificación final se basará en muy pocos datos de partida. En general, cuanto mayor sea el numero mínimo de datos por clase y más próximo a la unidad el intervalo de muestreo, mejores resultados obtendremos en la clasificación. Debe tenerse en cuenta, que a la hora de estimar los tiempos de computación, la clasificación con isuclaster se aplica en dos etapas. En la primera se realiza la clasificación propiamente dicha en una sola ocasión durante el periodo climático de referencia 1961-2000, en la que se obtiene un solo fichero con la firma espectral de cada clase, mientras que en un segundo paso este fichero único es usado en las sucesivas proyecciones a futuro, tantas veces como modelos de circulación general, escenarios y periodos climáticos sean considerados (más de 130 proyecciones para el 5° Informe del IPCC). Este hecho permite no tener que escatimar recursos computaciones a la hora de realizar la clasificación en el primer paso, ya que al ejecutarse en una sola ocasión, es posible sobredimensionar este parámetros.

La asignación de clases del algoritmo es arbitraria, y solo tras obtener los resultados de la zonificación durante el periodo climático de referencia, es posible asignar un nombre, descripción o agrupación de las clases obtenida en base a los conocimientos previos del experto. En lo máximo de lo posible se busca un resultado que atienda a parámetros climáticos que puedan reducirse a un espacio tridimensional relacionado con la disponibilidad de agua, térmicidad y grado de acoplamiento o distribución comparativa de ambos.

Respecto del funcionamiento del algoritmo, el proceso comienza con la asignación de medias arbitrarias por cada una de las clases. Posteriormente, cada vector de datos se asigna a la media más cercana por un criterio de mínima distancia euclídea,

de aquí la importancia que tiene la normalización de las variables, y vuelve a calcularse un nuevo centroide por clase. El proceso se repite tantas veces como se le ha especificado al algoritmo, obteniendo finalmente un vector medio por cada clase, caracterizado por las medias y covarianzas de las variables que lo definen. Es por esta razón que se debe especificar un número de iteraciones lo suficientemente grande como para garantizar la migración de vectores de un grupo a otro sea mínima y se vuelva estable. Es preciso que al aumentar el número de clases, también se aumente el numero de iteraciones. Finalmente el número óptimo de clases generalmente es desconocido, por lo que se recomienda usar un número alto, para posteriormente analizar los grupos resultantes y posteriormente volver a ejecutar el algoritmo con un número reducido de clases.

Los "Escenarios de Cambio Climático actualizados al 5° Informe del IPCC" han generado la proyección de las 44 variables facilitadas en la tabla 6.

ID	Alias	Nombre	Unidades	Orden
1	prc	Precipitacion acumulada	mm	1º
2	t_max	Temperatura maxima	ºC	1º
3	t-min	Temperatura minima	ºC	1º
4	ndf0	Número de heladas (T_min<=0ºC)	nº dias	1º
5	ndc40	Olas de Calor (T >= 40ºC)	nº dias	1º
6	ndc45	Olas de Calor extremas (T >= 45ºC)	nº dias	1º
7	nnt22	Noches tropicales (T_min >= 22ºC)	nº dias	1º
8	it	Integral termica sobre 7.5ºC	ºC/año	2º
9	gdr22	Grados dia Refrigeracion (T >= 22ºC)	ºC/año	2º
10	gdc16	Grados dia calefacción (T <= 16ºC)	ºC/año	2º
11	t_med	Temperatura media	ºC	2º
12	prcn	Precipitacion de nieve	mm	2º
13	eto	Evapotranspiración de referencia	mm	2º
14	bh	Balance Hídrico	mm	2º
15	bhp	Número de meses con Bh > 0	meses	2º
16	ia	Indice de aridez	ad	2º
17	pf	Potencial fotosistetico	ºC/año	2º
18	sup	Superhabit hídrico	mm	2º
19	def	Deficits hidrico	mm	2º
20	etr	Evapotranspiración real	mm	2º
21	dsq	Duración de la sequia	meses	2º
22	isq	Intensidad de la sequia	(ºC-mm)*mes	2º
23	ihd	Indice Hidrico Anual	ad	2º
24	ihm	Indice de Humedad Anua	ad	2º
25	icc	Indice de Continentalidad	ad	2º
26	ixt	Indice de Termicidad	ad	2º
27	ixtc	Indice de Termicidad corregido	ad	2º
28	pin	Precipitación de invierno	mm	2º
29	ppr	Precipitación de primavera	mm	2º
30	pve	Precipitación de verano	mm	2º
31	pot	Precipitación de otoño	mm	2º
32	tmc	Temperatura Media del mes mas Calido	ºC	2º
33	tmf	Temperatura Media del mes mas Frio	ºC	2º
34	osc	Oscilación Termica	ºC	2º
35	tmmf	Temperatura Media de las mínimas del mes más frio	ºC	2º
36	tmmc	Temperatura Media de las máximas del mes más cálido	ºC	2º
37	ost	Oscilación termica total	ºC	2º
38	io	Indice Ombrotermico	ad	2º
39	pmvd	CCH. Voto Medio Esperado Diurno.	ad	2º
40	pmvn	CCH. Voto Medio Esperado Nocturno.	ad	2º
41	iipd	CCH. Indice de Insatisfaccion Esperado Diurno.	%	2º
42	iipn	CCH. Indice de Insatisfaccion Esperado Nocturno.	%	2º
43	hipc	CCH. Horas de Insatisfaccion Esperadas (51%) por calor.	horas	2º
44	hipf	CCH. Horas de Insatisfaccion Esperadas (51%) por frio.	horas	2º

Tabla 6. Lista de Variables elaboradas en el 5º Informe del IPCC. Unidades y Orden.

Este ha sido también el conjunto de variables de partida para probar diferentes combinaciones con el fin de obtener una distribución de bioclimáticas coherente con otras fuentes de información territorial. La combinación seleccionada finalmente ha sido:

ID	Alias	Nombre	Periodo	Unidades
1	prc	Precipitación acumulada	Anual	mm
17	pf	Potencial fotosintético	Anual	°C/año
32	tmc	Temperatura Media del mes más Cálido	Anual	°C
33	tmf	Temperatura Media del mes mas Frio	Anual	°C

Tabla 7. Listado de variable usadas en la clasificación de bioclimas.

Sin embargo, las pruebas han sido numerosas hasta conseguir un resultado satisfactorio. A continuación son descritas cada una de estas variables:

Precipitación acumulada anual. Es la media de la precipitación acumulada durante el año en el periodo de referencia 1961-2000, expresada en milímetros. Los valores van desde 140 a 2.300 mm, con una media de 600 mm.

Potencial fotosintético anual. El Potencial Fotosintético se define como la integral térmica delimitada al rango de temperatura entre los 7.3°C y 40°C y condicionada a que el balance hídrico del suelo sea positivo. Este factor tiene en cuenta la temperatura máxima y mínima diarias, y el balance hídrico (evolución de la precipitación acumulada y la evapotranspiración) en un suelo sin limitaciones de almacenamiento. En el procedimiento de la clasificación entra a formar parte por la media anual durante el periodo de referencia 1961-2000, y está expresado en °C/año. Los valores van desde 0 a 3600°C/año, con una media de 870°C/año. La imagen 18 ofrece la distribución territorial de esta variable para toda Andalucía. El potencial fotosintético ha sido considerado en todas las combinaciones realizadas en el procedimiento, ya que cumple a la vez muchos de los criterios definidos en la metodología, por tratarse de una variable puramente fitológica que expresa la capacidad productiva máxima de un clima, integrando temperatura y precipitación, y acoplamiento temporal de ambos. El estudio de la continuidad temporal de esta variable puede dar claves fitosocilogicas importantes relacionadas con las diferentes estrategias vegetales a la hora de activar la fotosíntesis.

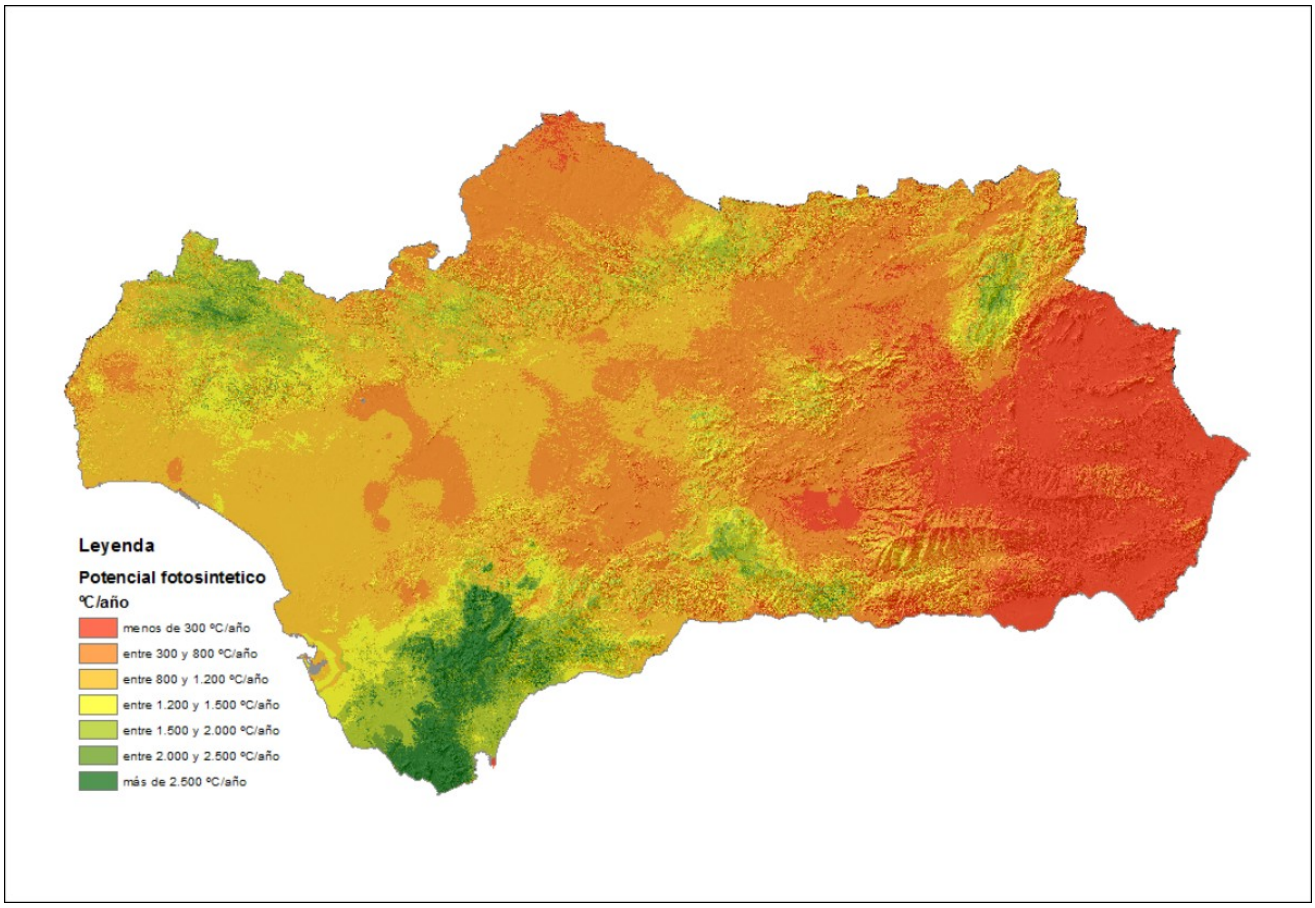

Imagen 18. Potencial fotosintetico anual.

Temperatura Media del mes más Cálido. Es media mensual de la temperatura del mes más cálido, es decir el mes del año con mayor temperatura media. Esta variable es calculada en el periodo de referencia 1961-2000, y expresada en °C. Los valores van desde 16.5 a 28.6°C, con una media de 25.4°C.

Temperatura Media del mes más Frio. Es media mensual de la temperatura del mes más frio, es decir el mes del año con menor temperatura media. Esta variable es calculada en el periodo de referencia 1961-2000, y expresada en °C. Los valores van desde 0 a 13.1 °C, con una media de 8.5°C.

Esta clasificación considera tanto factores macroclimáticos como microclimáticos, por lo que puede considerarse que a la escala de estudio puede detectar correctamente lugares especiales por su peculiar orografía.

- **Bibliografía relativa a la distribución Potencial de Especies Vegetales**

GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA. Colección Técnica.

GANDULLO, J.M.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R. y GÓMEZ, V. 2004a. Las estaciones ecológicas de los hayedos españoles. Monografías INIA. Serie Forestal n°8. Madrid.

GANDULLO, J.M.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R. y GÓMEZ, V. 2004b. Las estaciones ecológicas de los castañares españoles. Monografías INIA. Serie 97 Forestal n°7. Madrid.

GÓMEZ, V.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R.; GRAÑA, D. 2002. Autoecología de los castañares andaluces. Invest. Agr.: Sist. Recur. For., 11(1): 205-226.

SÁNCHEZ PALOMARES, O.; JOVELLAR, L.C.; SARMIENTO, L.A.; RUBIO, A.; GANDULLO, J.M. 2007a. Las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles. Monografías INIA. Serie Forestal n°14. Madrid.

SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ROIG GÓMEZ, S.; DEL RÍO GAZTELURRUTIA, RUBIO SÁNCHEZ, A.; GANDULLO, J.M. 2007b. Las estaciones autoecológicas actuales y potenciales de los rebollares españoles. Monografía INIA: Serie Forestal n°17. Madrid.

SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; ROIG, S.; RÍO, M.; RUBIO, A.; GANDULLO, J.M. 2008. Las estaciones ecológicas actuales y potenciales de los rebollares españoles. Monografías INIA:

Serie Forestal, n° 17. Madrid.

ALONSO PONCE, R.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ROIG, S., LÓPEZ SENESPLEDA, E.; GANDULLO, J.M. 2010. Las estaciones ecológicas actuales y potenciales de los sabinares albares españoles, 19. Monografías INIA. Serie Forestal n°19. Madrid.