Método de cálculo de la variable "Unidades bioclimáticas" (alias = unbio)

Las "Unidades bioclimáticas" $UNBIO_{00}^{m}$ (clasificación discreta) consisten en una zonificación climática de la región andaluza a escala de semidetalle, atendiendo a criterios fitoclimáticos, del periodo anual ($p=00$) y para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100) con los datos registrados (histórico observado) o proyectados (por cada combinación de Modelo de Circulación General (MCG) y escenario de emisiones (ESN)).

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. 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. A continuación es descrita la metodología seguida para construir esta variable y su proyección bajo escenarios locales de cambio climático.

BIOCLIMAS DE ANDALUCÍA

1. INTRODUCCIÓN

Andalucía es una región de paisajes ricos y diversos gracias, entre otros motivos, a la variedad climática de su territorio, donde el carácter mediterráneo siempre está presente. Ya sea el lugar más frio y seco o el más templado y húmedo, todos los paisajes andaluces se encuentran sometidos durante un periodo crítico para la vegetación, a varios meses cálidos y secos. Por otra parte, la heterogeneidad de su relieve en un enclave situado entre dos mares muy distintos, como son el Mediterráneo y Atlántico, le confieren una complejidad climática singular. Así, el Clima Mediterráneo en Andalucía ha imitado las combinaciones más sorprendentes y variopintas de muchos de los climas del planeta con el matiz mediterráneo, impregnando de un peculiar carácter a sus paisajes y paisanos.

Para la vegetación, el clima es uno de los factores mas importantes del hábitat. Siempre se ha dicho que el Clima es el factor modelador del resto de componentes del medio físico. Por medio de los fenómenos de meteorización y erosión, el clima actúa transformando relieve, roca y suelo, y condiciona la vegetación que crece sobre ellos. Es fácil imaginar esta relación, sin embargo, para el desarrollo de la vida vegetal no hay nada más lejos. Para una planta en condiciones naturales, es decir, sin inputs artificiales como el riego, el clima es quien define la envolvente de todos los arreglos a las que puede llegar su hábitat, y son el resto de componentes del medio físico, los que modelan y descubren la configuración final de este.

Esta visión que expone al clima como factor fundamental del hábitat, está ligada a multitud de acepciones, y por supuesto no hay que menospreciar los efectos intensificadores o atenuantes, que orografía, suelo y la propia comunidad vegetal ejercen sobre las condiciones generales que propicia el clima para crear microclimas y zonas singulares. Así, el concepto clásico de un hábitat "azonal", referido a un ecosistema o comunidad vegetal que no se define prioritariamente por sus características climáticas, es justo la contrapartida a este panorama. De esta manera, un hábitat "azonal" como puede ser un ecosistema de ribera, depende del clima en menor medida que la ladera de un bosque mediterráneo que prospere en sus proximidades. En el primero, toda una cuenca aguas arriba está contribuyendo con el agua que escurre para proporcionar humedad durante todo el año a una franja estrecha del territorio, mientras que el

bosque mediterráneo próximo, debe arreglárselas con la precipitación que directamente le cae desde la atmósfera. Entre uno y otro, existen multitud de combinaciones y gradientes, sin embargo, aun no nos hemos salido del esquema original, donde la contribución del relieve y suelo, solo reside en el modelado del clima.

Este punto de vista, puede ser importante a la hora de plantear una metodología destinada a la resolución de un problema. No obstante, hasta este momento, la intención solo persigue mostrar al lector la relevancia del clima, evidenciando que delimita las expectativas potenciales de un hábitat, y ponerlo en un contexto de cambio climático, asumiendo a éste como una transformación de dichas expectativas potenciales. Es por esta razón que el objeto proritario de este trabajo es conocer la situación inicial de partida de los bioclimas de Andalucía y crear una metodología para que de una forma objetiva y reproducible, sea posible construir un modelo bioclimatico independientemente de la localización espacial o temporal.

2. OBJETIVO

El presente documento expone la metodología y resultados obtenidos en el trabajo denominado "Bioclimas de Andalucia" cuyo objetivo principal consiste en realizar una zonificación climática de la región andaluza a escala de semidetalle, atendiendo a criterios fitoclimáticos. Este trabajo se ha realizado en el marco de un proyecto de mayor envergadura denominado "Escenarios de Cambio Climático actualizados al 5º y 6º Informe del IPCC" (ELCC5 y ELCC6), cuya finalidad consiste en en crear un instrumento base para conocer los efectos esperados del Cambio Climático sobre la región andaluza.

El proyecto ELCC5 y ELCC6 tienen como objetivo pronosticar de una forma analítica los cambios esperados en aspectos y procesos críticos tales como la temperatura y precipitación, producción primaria, hábitats, régimen hídrico, confort climático, etc. Sin embargo, esta visión es insuficiente cuando intentamos tener una panorámica general del problema, por lo que es necesario recurrir a estudios holísticos como el aquí expuesto, donde con una sola variable, las clases discretas bioclimáticas con semejante comportamiento, resumen los aspectos mas generales del clima, y como estos puede cambiar en el futuro.

En adelante, la información descrita de datos observados es la correspondiente a la estudiada en el 5º informe del IPCC.

3. METODOLOGÍA

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 (figura 1). 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.

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.

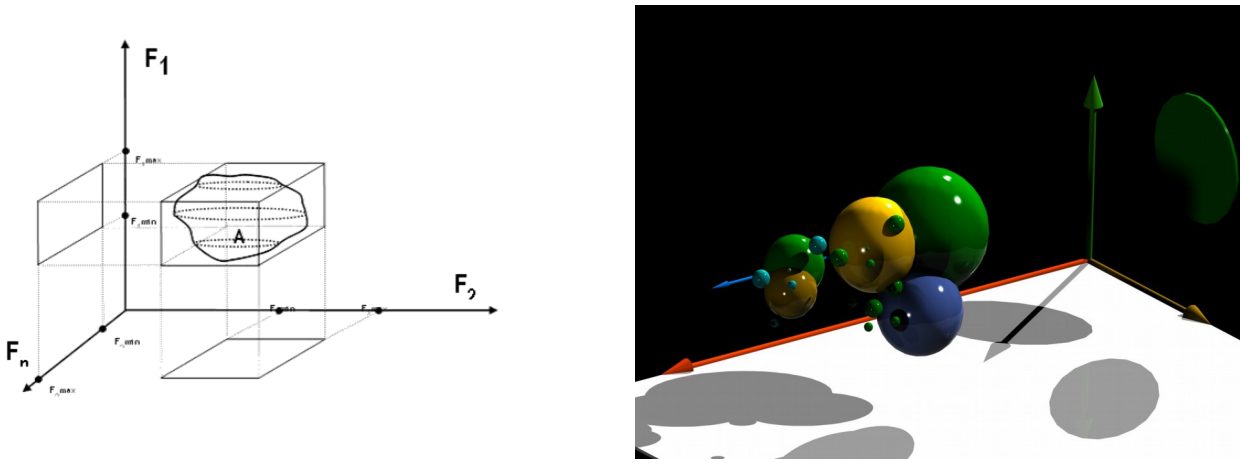


Figura 1. Representación en tres dimensiones de la clasificación de datos numéricos en conjunto de grupos de semejantes características.

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 (figura 2).

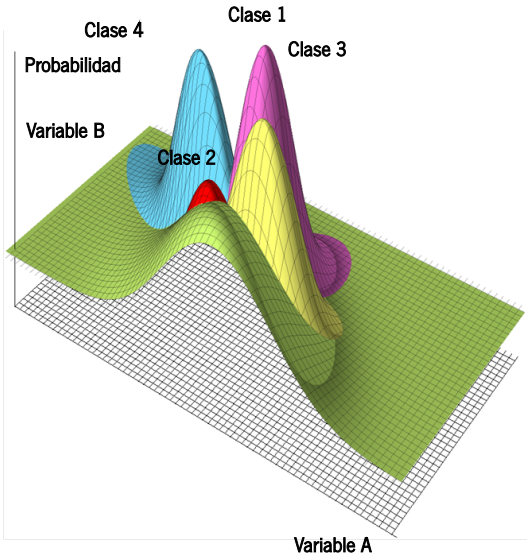


Figura 2. Representación en un espacio bidimensional de la probabilidad de pertenecer o no a una clase u otra representada por las superficies de probabilidad diferenciadas por colores. El eje Z corresponde a la probabilidad, mientras que X e Y representan las variables continuas.

La metodología usada en este trabajo ha sido una 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, sí 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.

3.1 Descripción del método de clasificación usado

El procedimiento usado para la clasificación y discriminación de áreas bioclimaticamente homogéneas es denominado como "método de clasificación 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.

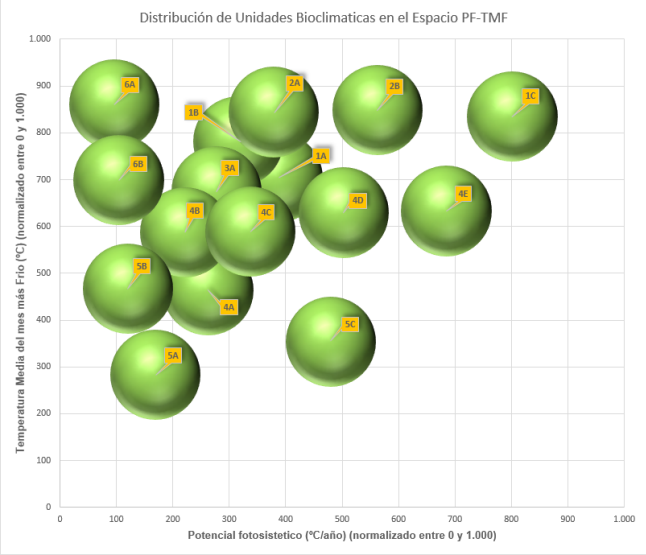
Como cabe esperar, las variables usadas y su número son determinantes para obtener unos u otros resultados, mientras que en segundo lugar de importancia, es el número de clases el parámetro con mas peso para obtener una delimitación que cuadre con la distribución de climas esperados. Siempre existe en 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 (figura 3). 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 isoclaster 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 5º 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 parámetro.

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 (figura 3).

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 (tabla 1). Es por esta razón que se debe especificar un número de iteraciones lo suficientemente grande como para garantizar que la migración de vectores de un grupo a otro sea mínima y se vuelva estable.



Codigo	Nombre
1A	Clima Mediterraneo de Presierras con Influencia Marátima Húmedo
1B	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima Subhúmedo
1C	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima muy Húmedo
2A	Clima Mediterraneo Cálido Subhúmedo
2B	Clima Mediterraneo Cálido y Húmedo
3A	Clima Mediterraneo Continental Seco de Veranos Cálidos
4A	Clima Mediterraneo Continental Subhúmedo de Inviernos muy Fríos
4B	Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos
4C	Clima Mediterraneo Continental de Inviernos Fríos y Veranos Cálidos
4D	Clima Mediterraneo Continental Húmedo de Inviernos Fríos
4E	Clima Mediterraneo Continental muy Húmedo de Inviernos Fríos
5A	Clima Mediterraneo Continental de Alta Montaña
5B	Clima Mediterraneo Continental de Altiplanicies Secas y Frías
5C	Clima Mediterraneo Continental Frío de Media Montaña
6A	Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral
6B	Clima Mediterraneo Subdesértico Interior

Figura 3. Distribución de las unidades bioclimáticas en el espacio PF-TMF (Potencial Fotosintético y Temperatura Mínima del mes más Frio.

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.

Firma por agrupación de Isoclaster	
Imagen	hist.ws\obs-hist-unbio.ws\d1961-2000.ws\0_vars
Numero de Clases	16
Iteraciones	100
Minimo tamaño de clase	20
Tamaño de muestreo	10
Numero de variables	4

ID Variable	Nombre	
1	pf61-00_0	Potencial fotosistetico (ºC/año) (normalizado entre 0 y 1.000)
2	tmc61-00_0	Temperatura Media del mes más Calido (ºC) (normalizado entre 0 y 1.000)
3	tmf61-00_0	Temperatura Media del mes más Frio (ºC) (normalizado entre 0 y 1.000)
4	prc61-00_0	Precipitación acumulada anual (mm) (normalizado entre 0 y 1.000)

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
1	300				Clima Mediterraneo Continental Frío de Media Montaña
Variables ID	1	2	3	4	**Clima Mediterráneo Continental Frío de Media Montaña**
	480,1	779,6	353,8	435,8	Media
1	5749,7	1524,8	3169,8	588,6	Covarianza
2	1524,8	1459,3	2210,9	-315,2	
3	3169,8	2210,9	6498,6	-448,7	
4	588,6	-315,2	-448,7	3237,4	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
2	684				Clima Mediterraneo Continental de Alta Montaña
Variables ID	1	2	3	4	
	169,4	737,4	282,7	290,9	Media
1	3787,1	100,7	-398,8	2527,0	Covarianza
2	100,7	2922,9	2181,3	-646,5	
3	-398,8	2181,3	4311,8	-2040,1	
4	2527,0	-646,5	-2040,1	4717,2	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
3	988				Clima Mediterraneo Continental Subhúmedo de Inviernos muy Fríos
Variables ID	1	2	3	4	
	262,6	836,3	463,7	292,7	Media
1	3018,8	-34,2	-181,0	1288,2	Covarianza
2	-34,2	1447,7	401,4	-417,6	
3	-181,0	401,4	2090,7	-532,0	
4	1288,2	-417,6	-532,0	2393,8	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
4	1906				Clima Mediterraneo Continental de Altiplanicies Secas y Frías
Variables ID	1	2	3	4	
	120,2	829,8	467,3	170,9	Media
1	1032,1	103,0	76,3	545,6	Covarianza
2	103,0	1182,8	700,5	-63,0	
3	76,3	700,5	3199,0	-304,6	
4	545,6	-63,0	-304,6	881,9	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
6	2866				Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos
Variables ID	1	2	3	4	
	221,5	919,5	587,5	224,0	Media
1	1336,2	-10,1	53,2	404,9	Covarianza
2	-10,1	1065,7	343,6	-100,0	
3	53,2	343,6	1031,2	-118,6	
4	404,9	-100,0	-118,6	812,3	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
7	866				Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral
Variables ID	1	2	3	4	
	96,6	918,7	861,0	113,4	Media
1	493,2	-247,9	172,5	389,8	Covarianza
2	-247,9	644,9	268,2	-390,9	
3	172,5	268,2	2654,3	-211,2	
4	389,8	-390,9	-211,2	808,1	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
8	1858				Clima Mediterraneo Continental de Inviernos Fríos y Veranos Cálidos
Variables ID	1	2	3	4	
	336,9	895,4	589,1	289,1	Media
1	1278,4	-56,3	-175,5	76,6	Covarianza
2	-56,3	1527,5	12,1	-480,0	
3	-175,5	12,1	1548,3	-50,1	
4	76,6	-480,0	-50,1	1309,0	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
9	1154				Clima Mediterraneo Continental Húmedo de Inviernos Fríos
Variables ID	1	2	3	4	
	502,6	878,3	629,7	340,4	Media
1	2720,2	356,9	575,9	-370,6	Covarianza
2	356,9	1570,0	424,7	-532,2	
3	575,9	424,7	2647,1	131,5	
4	-370,6	-532,2	131,5	2019,4	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
10	2643				Clima Mediterraneo Continental Seco de Veranos Cálidos
Variables ID	1	2	3	4	
	277,7	929,3	674,7	232,6	
1	951,5	169,1	24,6	308,3	
2	169,1	1063,9	-210,0	-37,8	
3	24,6	-210,0	1019,5	-23,2	
4	308,3	-37,8	-23,2	718,0	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
11	1311				Clima Mediterraneo de Presierras con Influencia Marátima Húmedo
Variables ID	1	2	3	4	
	385,9	905,5	704,2	296,8	Media
1	1010,2	297,8	358,3	-265,1	
2	297,8	917,3	26,4	-140,2	Covarianza
3	358,3	26,4	1476,6	299,2	
4	-265,1	-140,2	299,2	1169,8	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
14	754				Clima Mediterraneo Cálido y Húmedo
Variables ID	1	2	3	4	
	562,4	881,9	848,8	350,6	Media
1	2689,9	162,2	-249,6	-164,8	
2	162,2	724,2	-716,7	-323,7	Covarianza
3	-249,6	-716,7	3787,7	436,5	
4	-164,8	-323,7	436,5	2170,3	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
15	483				Clima Mediterraneo Continental muy Húmedo de Inviernos Fríos
Variables ID	1	2	3	4	
	684,6	849,7	632,7	495,6	Media
1	3922,6	677,4	1190,9	2316,9	
2	677,4	861,8	859,1	17,4	Covarianza
3	1190,9	859,1	3876,3	-1399,8	
4	2316,9	17,4	-1399,8	12404,3	

Clase ID	Tamaño				Nombre de Clase
16	484				Clima Mediterraneo con Influencia Marátima muy Húmedo
Variables ID	1	2	3	4	
	801,4	864,7	834,8	463,3	Media
1	4582,9	-438,4	1178,2	1547,8	
2	-438,4	365,1	-567,6	-463,7	Covarianza
3	1178,2	-567,6	4940,4	-1041,8	
4	1547,8	-463,7	-1041,8	3872,8	

Tabla 1. Fichero de firmas de medias y covarianzas para la combinación de variables adoptada agrupada en 16 clases.

Durante el proceso de migración de las medias es posible que se produzca una simplificación de las clases en el caso de que los valores de los datos y los medias del grupo inicial no se distribuyen de manera uniforme, los grupos sean menores del tamaño mínimo de clase asignado, o la migración de dos a mas clases converja a una media muy próxima.

3.2 Variables usadas en la clasificación

Los "Escenarios de Cambio Climático actualizados al 5º Informe del IPCC" han generado la proyección de las 44 variables facilitadas en la tabla 2. Este ha sido también el conjunto de variables de partida para probar diferentes combinaciones con el fin de obtener una distribución de zonas bioclimáticas coherente con otras fuentes de información territorial.

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

Tabla 2. Variables generadas en el proyecto ELCC5.

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 3. Variables usadas en la clasificación isoclaster.

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. La figura 4 ofrece la distribución territorial de esta variable para toda Andalucía. En cierta medida es redundante con el potencial fotosintetico (gráfica 5), sin embargo, ha sido incluida con el fin de dar doble peso al factor precipitación.

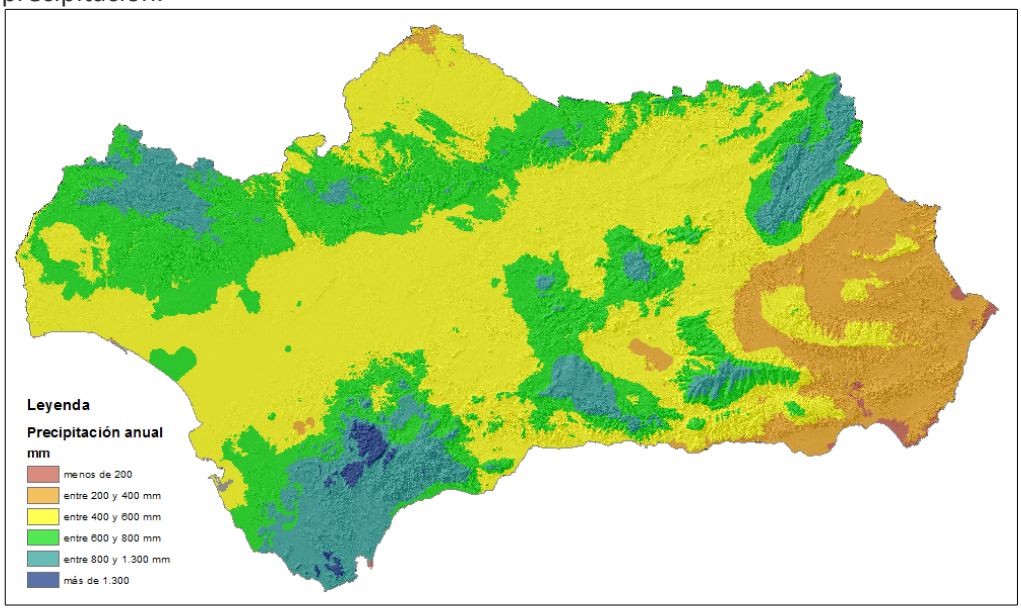
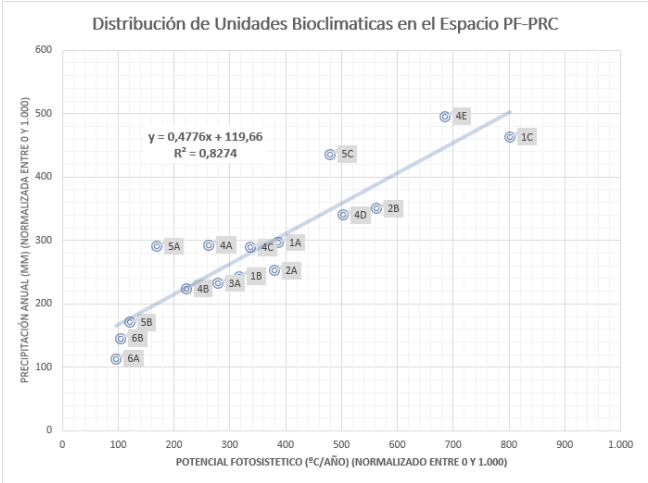


Figura 4. Precipitación media anual acumulada.



Codigo	Nombre
1A	Clima Mediterraneo de Presierras con Influencia Marátima Húmedo
1B	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima Subhúmedo
1C	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima muy Húmedo
2A	Clima Mediterraneo Cálido Subhúmedo
2B	Clima Mediterraneo Cálido y Húmedo
3A	Clima Mediterraneo Continental Seco de Veranos Cálidos
4A	Clima Mediterraneo Continental Subhúmedo de Inviernos muy Fríos
4B	Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos
4C	Clima Mediterraneo Continental de Inviernos Fríos y Veranos Cálidos
4D	Clima Mediterraneo Continental Húmedo de Inviernos Fríos
4E	Clima Mediterraneo Continental muy Húmedo de Inviernos Fríos
5A	Clima Mediterraneo Continental de Alta Montaña
5B	Clima Mediterraneo Continental de Altiplanicies Secas y Frías
5C	Clima Mediterraneo Continental Frío de Media Montaña
6A	Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral
6B	Clima Mediterraneo Subdesértico Interior

Gráfica 5. Correlación entre la precipitación y el potencial fotosintetico. Como puede verse esta relación queda en un plano con un R^2 de 0,82.

Potencial fotosintético anual.

El Potencial Fotosintético se define como la integral térmica delimitada al rango de temperatura entre los 7.3ºC y 40ºC, 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 ºC/año. Los valores van desde 0 a 3600ºC/año, con una media de 870ºC/año. La figura 6 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 fitosociologicas importantes relacionadas con las diferentes estrategias vegetales a la hora de activar la fotosíntesis.

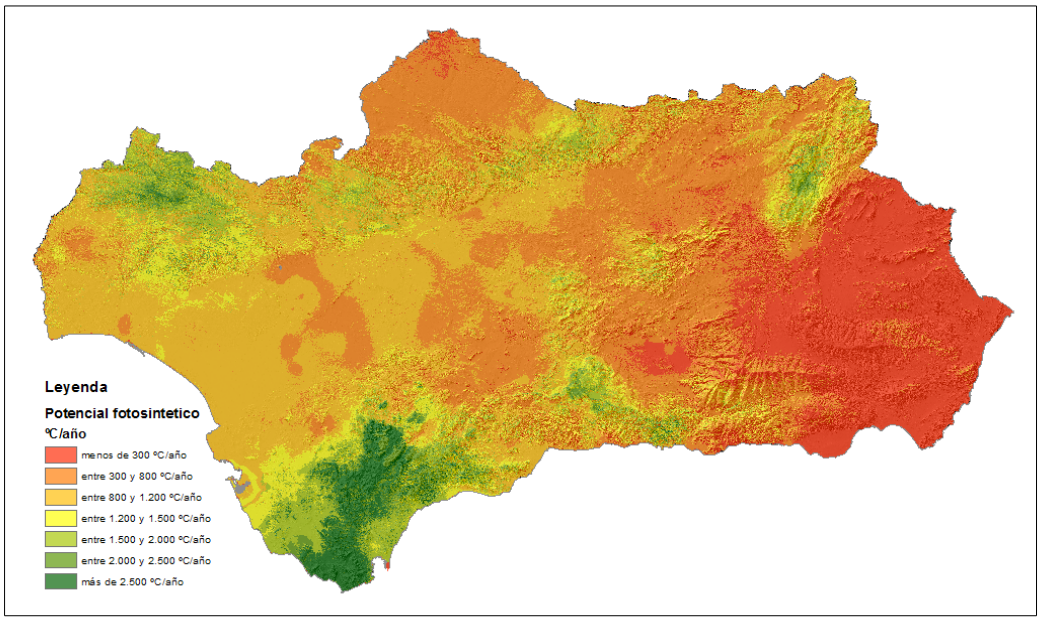


Figura 6. Potencial fotosintetico anual.

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 ºC. Los valores van desde 16.5 a 28.6ºC, con una media de 25.4ºC. La figura 4 ofrece la distribución territorial de esta variable para toda Andalucía. Esta variable responde al principio del factor limitante por temperatura máxima. El número de días con mas de 40ºC hubiera sido también una variable correcta para implicar el factor limitante de temperatura máxima, sin embargo, se ha observado que las variables que no implican un umbral de delimitación tienen una capacidad mas discriminatoria en la clasificación.

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 ºC. Los valores van desde 0 a 13.1 ºC, con una media de 8.5ºC. La figura 4 ofrece la distribución territorial de esta variable para toda Andalucía. Esta variable responde al principio del factor limitante por temperatura mínima. La variable "número de heladas anual" también daba buenos resultados en la clasificación, pero se ha optado por esta por las mismas razones que la variable anterior.

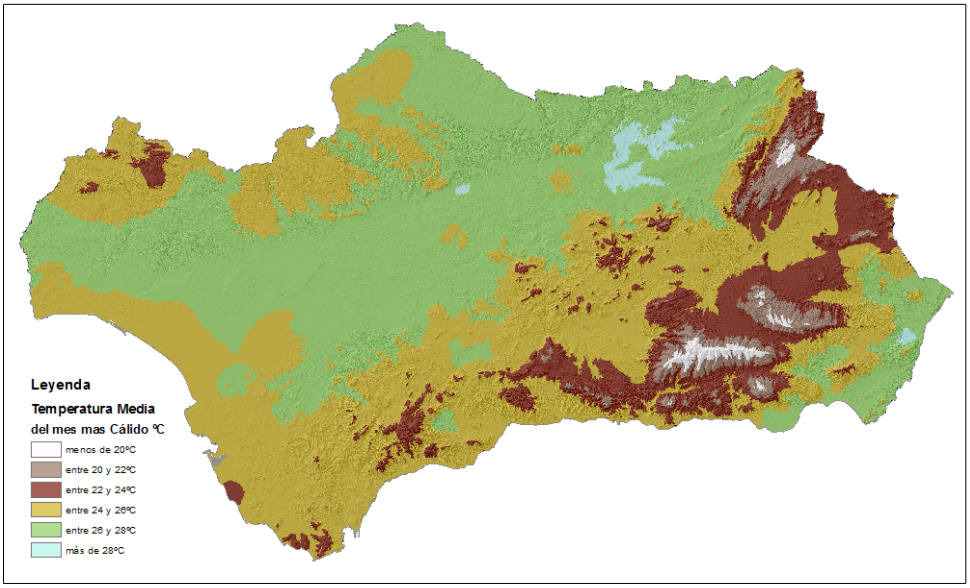


Figura 4. Temperatura Media del mes más Cálido.

Esta clasificación considera tanto factores macroclimaticos como microclimaticos, por lo que puede considerarse que a la escala de estudio puede detectar correctamente lugares especiales por su peculiar orografía. Según Walter, H.“… para las plantas es completamente indiferente que, por ejemplo, las condiciones térmicas favorables estén determinadas por el macroclima o por la localización del biotopo en una ladera resguardada hacia el sur. Tampoco tiene importancia para las plantas que la humedad necesaria del suelo se consiga gracias a una distribución favorable de las precipitaciones, o una evapotranspiración reducida debida a una orientación hacia el norte o a la estructura del suelo y a la proximidad del agua freática, lo principal es que la planta no carezca de agua.”.

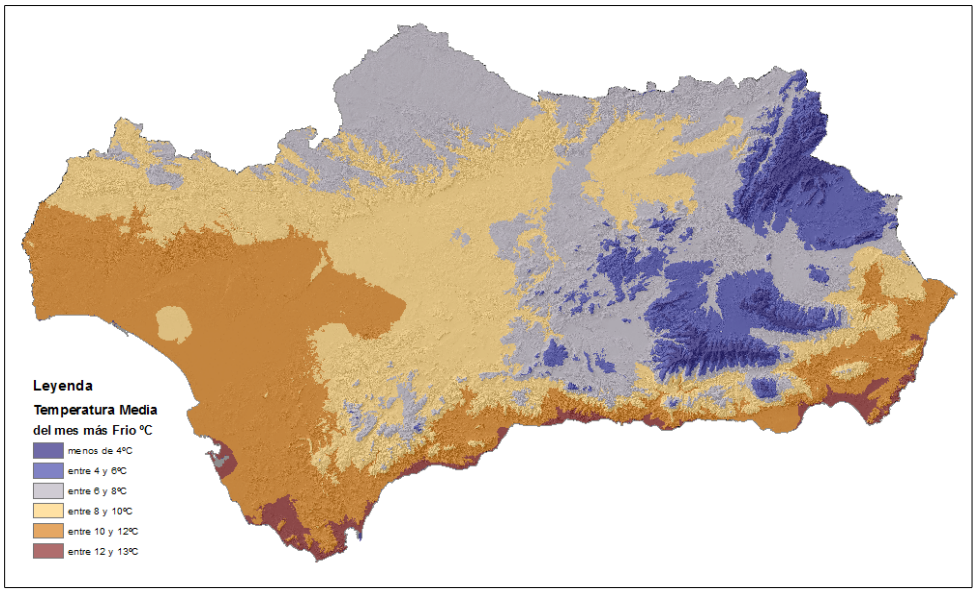


Figura 5. Temperatura Media del mes más Frio.

Esta discriminación es aportada por el factor del relieve denominado “Incidencia Solar”, que modula la cantidad de energía solar neta efectiva que llega a la superficie del suelo, y por consiguiente la evapotranspiración de referencia del lugar, calculada por el modelo de “ETo de Penman-Monteith modificada bajo condiciones de montaña”.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La figura 6 representa la agrupación en 6 grandes clases o "unidades bioclimáticas" de las 16 clases originales o "subunidades bioclimáticas" (gráfica 6) obtenidas mediante el uso del "algoritmo de clasificación isoclaster" no supervisado de cuatro variables bioclimáticas continuas: PF o "potencial fotosintetico", TMC o "temperatura media del mes más cálido", TMF o "temperatura media del mes más frio" y PRC "precipitación acumulada media anual" (figura 7 y tabla).

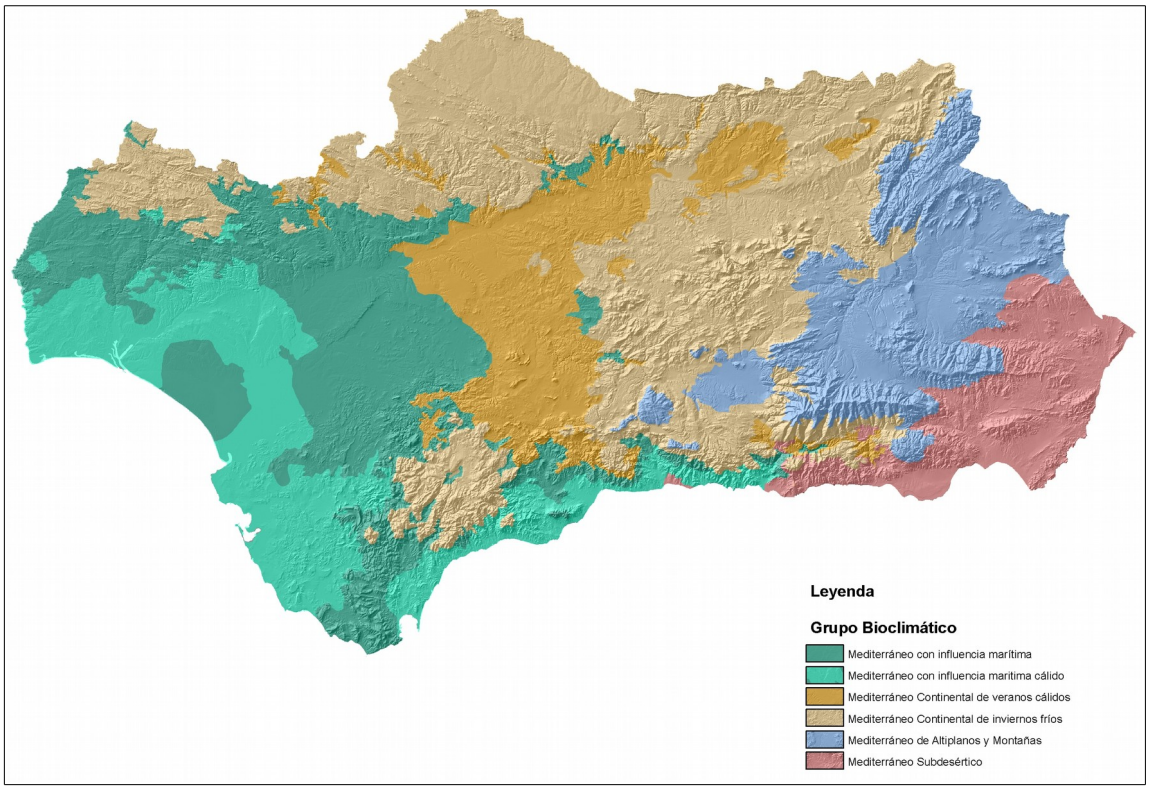
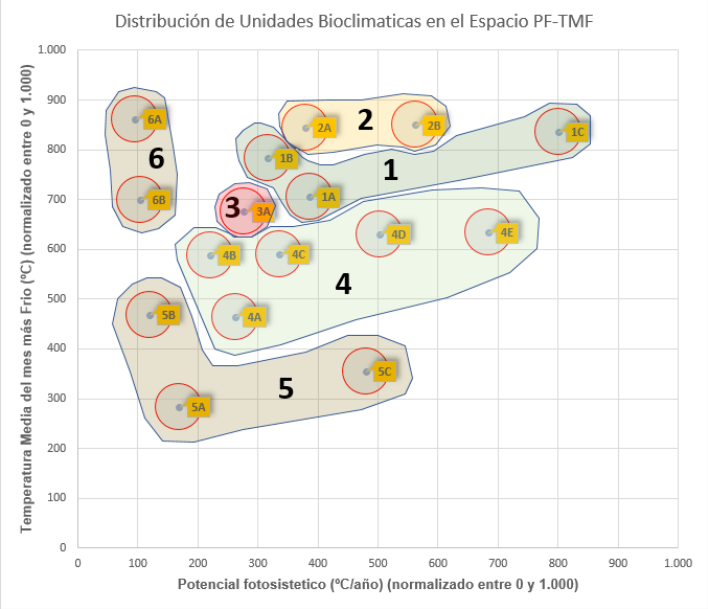


Figura 6. Clasificación bioclimática de Andalucía para el periodo 1961-2000. Unidades Bioclimáticas.



Unidad	Subunidad	Nombre
1	1A	Clima Mediterraneo de Presierras con Influencia Marátima Húmedo
	1B	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima Subhúmedo
	1C	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima muy Húmedo
2	2A	Clima Mediterraneo Cálido Subhúmedo
	2B	Clima Mediterraneo Cálido y Húmedo
3	3A	Clima Mediterraneo Continental Seco de Veranos Cálidos
4	4A	Clima Mediterraneo Continental Subhúmedo de Inviernos muy Fríos
	4B	Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos
	4C	Clima Mediterraneo Continental de Inviernos Fríos y Veranos Cálidos
	4D	Clima Mediterraneo Continental Húmedo de Inviernos Fríos
	4E	Clima Mediterraneo Continental muy Húmedo de Inviernos Fríos
5	5A	Clima Mediterraneo Continental de Alta Montaña
	5B	Clima Mediterraneo Continental de Altiplanicies Secas y Frías
	5C	Clima Mediterraneo Continental Frío de Media Montaña
6	6A	Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral
	6B	Clima Mediterraneo Subdesértico Interior

Gráfica 6. Agrupación de subunidades bioclimáticas en unidades bioclimaticas.

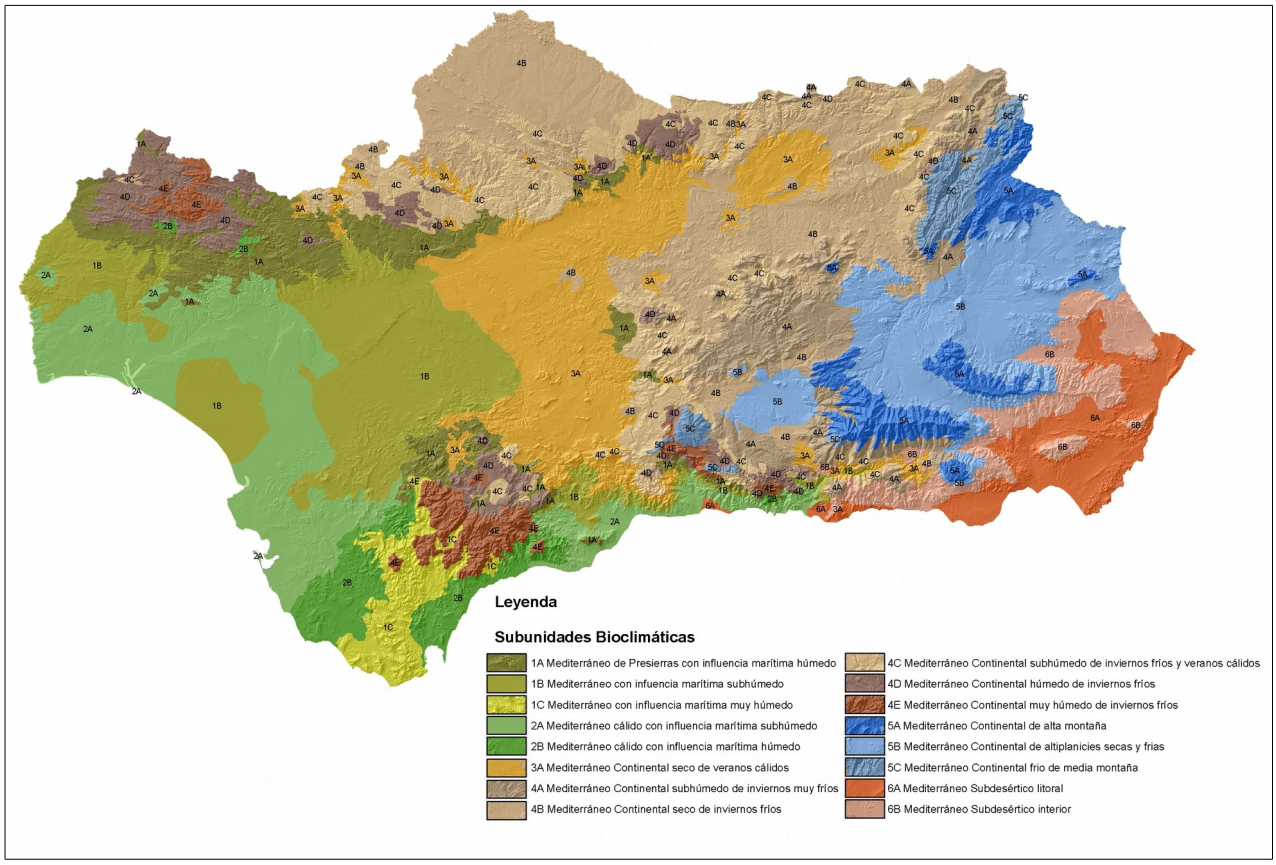


Figura 7. Clasificación bioclimática de Andalucía para el periodo 1961-2000. Subunidades Bioclimáticas.

Los grupos climáticos en los que se agrupan son descritos a continuación:

1. Clima Mediterráneo con influencia marítima: este clima se da en toda la región influenciada por la costa Atlántica Andaluza, que suaviza las temperaturas y aporta una humedad notable a la región. Asciende por el Valle Bajo del Guadalquivir hasta transformarse en "Clima Mediterráneo Sub-continental de veranos cálidos". Esta clase agrupa a tres subunidades bioclimáticas, diferenciadas básicamente por la precipitación y productividad, siendo su escaso grado de continentalidad el carácter que las unifica, solo por debajo de la unidad 2 y subunidad 6A (gráfica 6). La componen las siguientes subunidades:

1A. Mediterráneo de Presierras con influencia marítima húmedo. Esta unidad bioclimática se enclava fundamentalmente en las zonas que se ven beneficiadas por las lluvias originadas por el efecto orográfico que propicia la primera linea de elevación de Sierra Morena fundamentalmente, y en menor medida, Sierras Subbéticas y Sierras de Cádiz. Su cercanía al atlántico y no excesiva elevación les confiere una suavidad en las temperaturas.

1B. Mediterráneo con influencia marítima subhúmedo. Esta subunidad corresponde al cinturón previo de escasa elevación a la región previa a las presierras de Sierra Morena y Sierra de Cádiz, medio Valle del Guadalquivir donde se instaura la unidad 3A, mas continental y calurosa, así como la primera linea de elevación de las sierras de Málaga.

1C. Mediterráneo con influencia marítima muy húmedo. Esta subunidad bioclimática discrimina muy claramente la región montañosa próxima al Estrecho de Gibraltar en la que se emplaza la denominada "Selva Mediterránea". Se trata de la región más productiva de Andalucía desde el punto de vista climático, propiciando ecosistemas muy singulares caracterizados por una alta precipitación en condiciones de temperaturas suaves, al verse beneficiados por las corrientes y cercanía al Atlantico y Mar Mediterráneo (tabla 4).

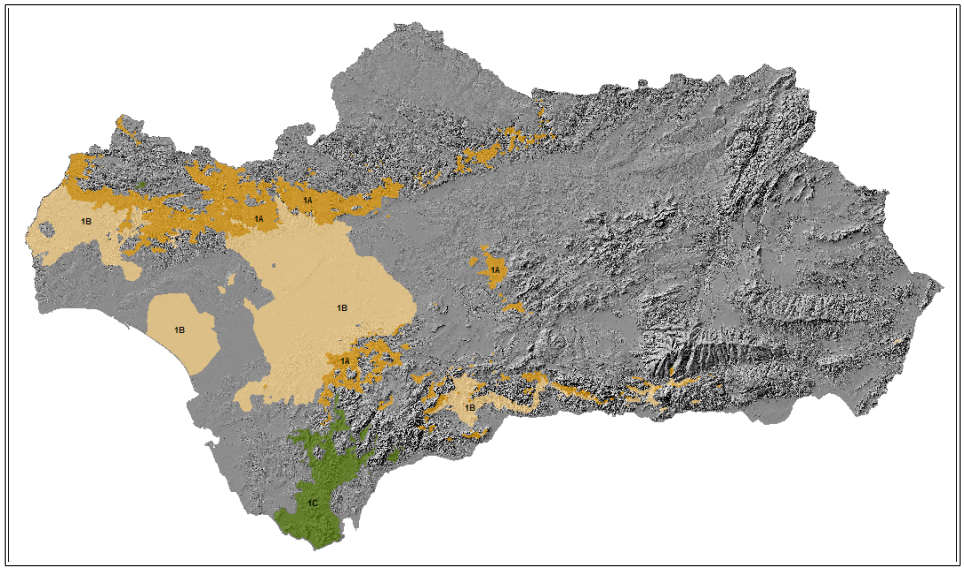


Figura 8. Subunidades Bioclimáticas del Clima Mediterráneo Oceánico

2. Clima Mediterráneo con influencia marítima cálido: propio de la costa mediterránea y atlántica, se caracteriza por las temperaturas suaves y ausencia de heladas, combinado con precipitaciones lo suficientemente altas como para dar una productividad mayor de 1.000ºC/año. Junto a la subunidad 6A o "Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral", constituyen las áreas con mayor TMF (gráfica 6) o lo que es igual menor continentalidad, lo que le da su carácter subtropical. Las precipitaciones son variables, existiendo una especie de simetría Atlántico-Mediterráneo cuyo eje se sitúa en el Estrecho de Gibraltar, aumentando según se avanza hacia este eje o en altitud. Agrupa a dos subunidades bioclimáticas en función de la precipitación y productividad. La primera constituye el cinturón atlántico y mediterráneo de Huelva, Cádiz y Málaga, mientras que la segunda se situá alrededor de las Sierra de Cádiz, en el primer frente montañoso antes de convertirse en la subunidad 1C, tanto en la vertiente este como oeste.

2A Mediterráneo cálido subhúmedo. Se trata de la costa tropical de Huelva, Cádiz y Málaga, que se transforma en la subunidad 6A o "Clima Mediterráneo Subdesértico Litoral" en Granada y Almería, como consecuencia de la drástica disminución de la precipitación. El aumento de las precipitaciones en las proximidades al eje de simetría norte-sur del Estrecho de Gibraltar transforma esta subunidad en la 2B o "Mediterraneo Cálido Húmedo", más húmeda y productiva (gráfica 6) y sensiblemente más continental (tabla 4).

2B Mediterráneo cálido húmedo. Esta subunidad constituye el área de influencia del bioclima 1C o "Mediterráneo con influencia marítima muy húmedo ". Se trata del primer frente montañoso de las Sierras de Cádiz ro. Se caracteriza por presentar temperaturas medias anuales elevadas y por tener veranos muy cálidos. Los inviernos son frescos y con heladas ocasionales. Las precipitaciones presentan sus máximy Málaga, que se transforma en 1C cuando aumenta la precipitación. Es una de las subunidades más productivas de Andalucía desde el punto de vista bioclimático, siendo superada solo por 1C y 4E en el interior de estas mismas sierras.

3. Clima Mediterráneo Continental de veranos cálidos: se extiende fundamentalmente por el Valle Medio del Guadalquivir. A modo de corona, se transforma en "Clima Mediterráneo Sub-continental de Inviernos Fríos" cuando el carácter continental se hace más seveos en primavera y otoño. Esta clase solo tiene una subunidad con el mismo nombre:

3A Mediterráneo Continental seco de veranos cálidos. Esta subunidad responde a la versión seca y fría del 4B o "Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos", se concentra en el zona media del Valle del Guadalquivir y Genil, con algunas áreas dispersas en Sierra Morena, Sierra de Málaga y Baja Alpujarra. Su característica fundamental son sus veranos muy cálidos con frecuentes olas de calor, y su continentalidad intermedia entre el Oceánico y el Continental.

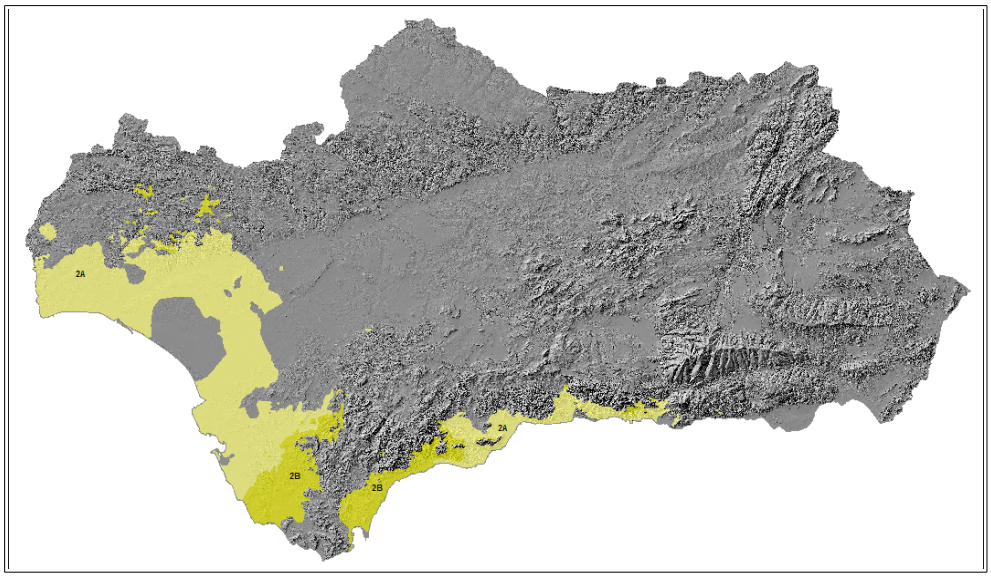


Figura 9. Subunidades Bioclimáticas del Clima Mediterráneo Subtropical

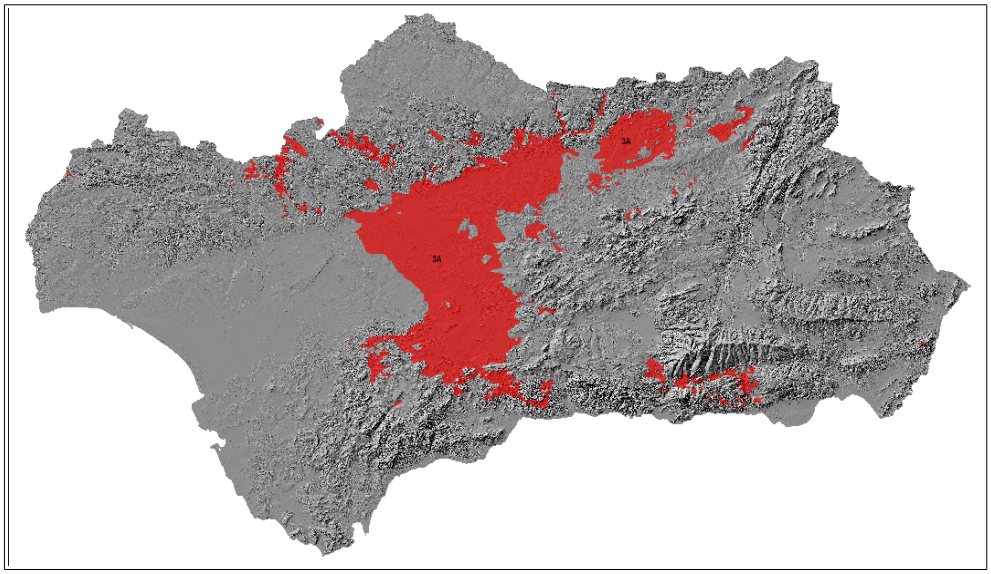


Figura 10. Subunidades Bioclimáticas del Clima Mediterráneo Sub-continental de Veranos Cálidos.

4. Clima Mediterráneo Continental de inviernos fríos: este clima es característico de casi toda la zona interior y elevada que rodea al Valle del Guadalquivir, penetrando hacia Andalucía Oriental hasta la misma base de las cadenas montañosas donde deriva en Montañas y Altiplanicies al Clima Mediterráneo Continental. Sus veranos son cálidos, aunque no tanto como en 3A, y los inviernos muy fríos, con un alto número de heladas. Este grupo climático está integrando por hasta 5 tipos diferentes de subunidades bioclimaticas con un amplio rango de precipitaciones.

4A Mediterráneo Continental Subhúmedo de inviernos muy fríos. Es la subunidad mas fría de este grupo y que solo por coherencia con clasificaciones pasadas no se ha unido a la clase 5 o Mediterráneo Continental (gráfica 6) (podría pasarse). Está constituida por sierras de escasa altitud, o zonas de presierra de mayor entidad.

4B Mediterráneo Continental seco de inviernos fríos. Esta subunidad es la más seca y menos productiva del grupo 4. Se distribuye fundamentalmente por el Alto Valle del Guadalquivir y Alto Guadiato.

4C Mediterráneo Continental subhúmedo de inviernos fríos y veranos cálidos. Es la versión mas continental de 3A, constituyendo el primer cinturón montañoso interior de áreas como Sierra Morena, Sierra Sur de Jaén, Cazorla y las Villas, o extendiéndose casi al completo por Sierras Subbeticas.

4D Mediterráneo Continental húmedo de inviernos fríos. Esta es la versión húmeda de 4C, encontrándose en enclaves dispersos con precipitación de 800 mm de media por toda Sierra Morena y Serranía de Ronda, fundamentalmente.

4E Mediterráneo Continental muy húmedo de inviernos fríos. Es la subunidad mas lluviosa y una de las mas productivas de toda Andalucía. Esta localizada fundamentalmente en la Serranía de Ronda y Sierra de Aracena.

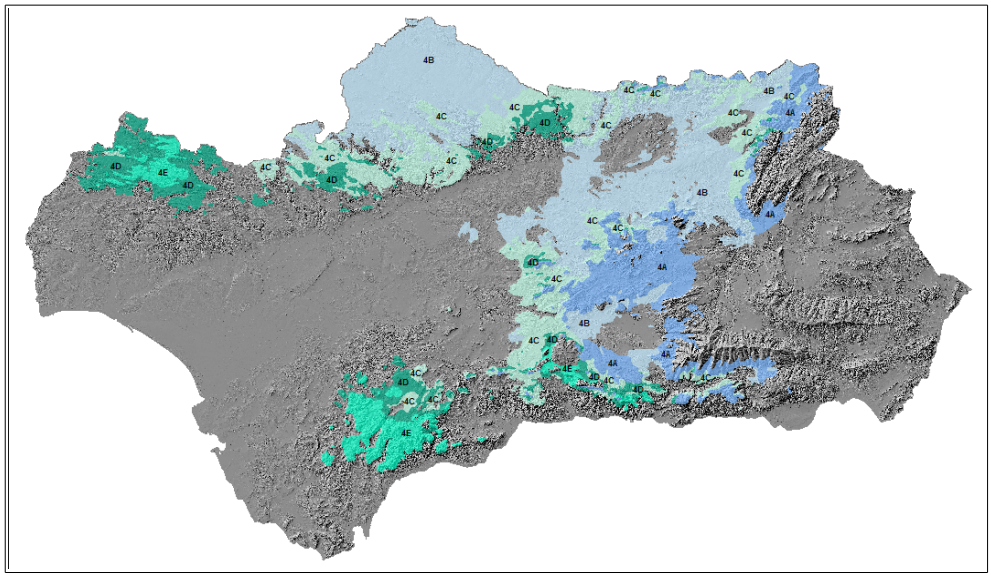


Figura 11. Subunidades Bioclimáticas del Clima mediterráneo sub-continental de inviernos fríos.

4E Mediterráneo Continental muy húmedo de inviernos fríos. Es la subunidad mas lluviosa y una de las mas productivas

5. Clima Mediterráneo de altiplanos y montañas: se da en todas las zonas de media y alta montaña de las Sierras o altiplanicies que alcanzan más de 2000 metros de altura. Se caracteriza por presentar inviernos muy fríos y largos, y veranos muy cortos y poco calurosos. Se trata de un grupo bioclimático de mucho carácter constituido por tres subunidades bioclimáticas, donde cierto porcentaje de sus precipitaciones lo hace en forma de nieve.

5A Mediterráneo Continental de alta montaña. Esta subunidad se extiende a lo largo de las cadenas montañosas de Sierra de Segura, Castril y Sagra, Filabres y Baza, Sierra Nevada y Gador. Corresponde al clima de alta y media montaña, de baja productividad a pesar de su alta precipitación.

5B Mediterráneo Continental de altiplanicies secas y frías. Esta es una subunidad que se extiende fundamentalmente por el Altiplano Granadino, seco, frio y poco productivo desde el punto de vista fitoclimatico.

5C Mediterráneo Continental frio de media montaña. Las altas precipitaciones hacen que se trate de una unidad muy productiva que se extiende por la Sierra de Cazorla, Segura y Las Villas; y la Sierra de Loja.

6. Clima Mediterráneo Subdesértico: este grupo bioclimático está constituido por subunidades poco productivas desde el punto de vista fitoclimatico, debido a las escasa precipitaciones de menos de 350 mm. Desde el punto de vista de la clasificación es una agrupación muy robusta y con un carácter muy marcado, espacialmente distantes del resto de subunidades. Las dos unidades que agrupa se distinguen por su continentalidad.

6A Clima Mediterraneo Subdesértico itoral. Esta subunidad bioclimatica es característica de la zona con influencia costera del este de Andalucía. Se caracteriza por sus temperaturas suaves, ausencia de heladas y muy bajas precipitaciones.

6B Clima Mediterraneo Subdesértico Interior. Es la versión algo mas continental e interior de 6A, cuya elevación la hace algo mas húmeda y productiva.

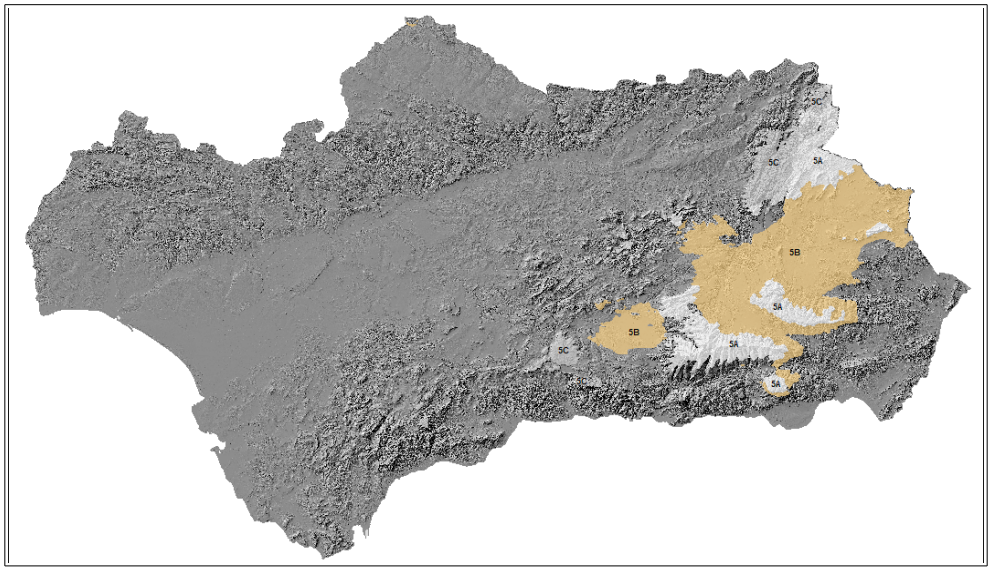


Figura 12. Subunidades Bioclimáticas del Clima Mediterráneo de montaña.

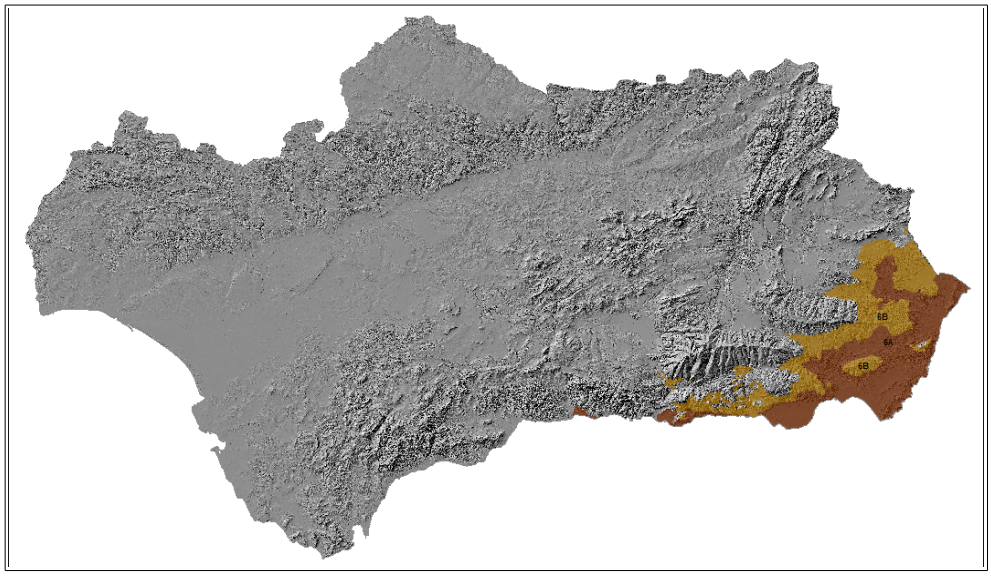


Figura 13. Subunidades Bioclimáticas del Clima mediterráneo subdesértico

				Vector de medias			
ID Unidad	Unidad	ID Subunidad	Subunidad	PF (ºC/año)	TMC (ºC)	TMF (ºC)	PRC(ºC)
1	Clima Mediterraneo Oceanico	1A	Clima Mediterraneo de Presierras con Influencia Marátima Húmedo	1217	25,9	9,2	704
		1B	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima Subhúmedo	943	26,2	10,2	564
		1C	Clima Mediterraneo con Influencia Marátima muy Húmedo	2730	24,7	10,9	1080
2	Clima Mediterraneo Subtropical	2A	Clima Mediterraneo Cálido Subhúmedo	1136	25,9	11,0	584
		2B	Clima Mediterraneo Cálido y Húmedo	1850	25,1	11,3	833
3	Clima Mediterraneo Sub-continental de veranos calidos	3A	Clima Mediterraneo Continental Seco de Veranos Cálidos	782	26,5	8,8	536
4	Clima Mediterraneo Sub-continental de inviernos frios	4A	Clima Mediterraneo Continental Subhúmedo de Inviernos muy Fríos	719	24,1	6,1	663
		4B	Clima Mediterraneo Continental Seco de Inviernos Fríos	585	26,5	7,6	516
		4C	Clima Mediterraneo Continental de Inviernos Fríos y Veranos Cálidos	990	25,7	7,7	674
		4D	Clima Mediterraneo Continental Húmedo de Inviernos Fríos	1503	25,0	8,2	809
		4E	Clima Mediterraneo Continental muy Húmedo de Inviernos Fríos	2194	24,2	8,2	1146
5	Clima Mediterraneo Continental	5A	Clima Mediterraneo Continental de Alta Montaña	340	21,2	3,6	654
		5B	Clima Mediterraneo Continental de Altiplanicies Secas y Frías	131	23,8	6,0	388
		5C	Clima Mediterraneo Continental Frío de Media Montaña	1463	22,4	4,6	1007
6	Clima Mediterraneo Subdesertico	6A	Clima Mediterraneo Subdesértico Litoral	23	26,3	11,2	258
		6B	Clima Mediterraneo Subdesértico Interior	123	24,7	9,0	341

Tabla 4. Unidades y subunidades bioclimaticas y vectores de medias de las variables discriminatorias.

La tabla nº 1 muestra el sumario de cada grupo climático, promedio de las variables que han servido para su clasificación.

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “Unidades bioclimáticas” es la siguiente:

unbio_<**MCG**>_<**ESN**>_**d**<**m**>_**<p>_COG**.**tif**

unbio= alias de “Unidades bioclimáticas”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual