

DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS ESTUDIADAS

EN EL PROYECTO

“ELABORACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES Y REGIONALES
DE CAMBIO CLIMÁTICO ADAPTADOS AL SEXTO INFORME
DEL GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE
EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC) Y SU DIFUSIÓN A TRAVÉS
DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA
COMUNICACIÓN”



INTRODUCCIÓN	5
1. TEMPERATURA MÁXIMA	6
2. TEMPERATURA MÍNIMA	6
3. PRECIPITACIÓN	6
4. NÚMERO DE HELADAS	7
5. OLAS DE CALOR	7
6. OLAS DE CALOR EXTREMO	7
7. NOCHES TROPICALES	8
8. INTEGRAL TÉRMICA SOBRE 7.5°C	8
9. GRADOS DÍA REFRIGERACIÓN	9
10. GRADOS DÍA CALEFACCIÓN	10
11. PRECIPITACIÓN DE NIEVE	11
12. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	12
13. BALANCE HÍDRICO	14
14. POTENCIAL FOTOSINTÉTICO	16
15. ÍNDICE DE CONTINENTALIDAD COMPENSADO	18
16. ÍNDICE DE TERMICIDAD	19
17. ÍNDICE DE TERMICIDAD COMPENSADO	19
18. TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS CÁLIDO	20
19. TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS FRÍO	20
20. TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES MÁS FRÍO	20
21. TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÁXIMAS DEL MES MÁS CÁLIDO	20
22. INDICE OMBROTÉRMICO	20
23. CCH: VOTO MEDIO ESPERADO DIURNO Y NOCTURNO	22
REFERENCIAS	30
24. CCH: ÍNDICE DE INSATISFACCIÓN ESPERADO DIURNO Y NOCTURNO	30
REFERENCIAS	33
25. CCH: HORAS DE INSATISFACCIÓN ESPERADAS (51%) POR CALOR Y POR FRÍO	33
26. UNIDADES BIOCLIMÁTICAS	39
27. MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES (SDM)	39
27.1 SDM SEGÚN AUTOECOLOGÍA PARAMÉTRICA	40

27.2 N° DE VARIABLES ÓPTIMAS	42
27.3 SDM SEGÚN GAM REGULARIZADO	42
28. TEMPERATURA MEDIA	44
29. N° DE MESES CON BH > 0	45
30. ÍNDICE DE ARIDEZ	45
31. SUPERÁVIT HÍDRICO	46
32. DÉFICIT HÍDRICO	46
33. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL	47
34. DURACIÓN DE LA SEQUÍA	48
35. INTENSIDAD DE LA SEQUÍA	49
36. ÍNDICE HÍDRICO ANUAL	50
37. ÍNDICE DE HUMEDAD ANUAL	51
38. OSCILACIÓN TÉRMICA	52
39. OSCILACIÓN TÉRMICA TOTAL	53
40. FACTOR DE DISPONIBILIDAD FOTOSINTÉTICA	53
41. ÍNDICES DE SEQUÍA: SPI	55
REFERENCIAS	56
42. ÍNDICES DE SEQUÍA: SPEI	56
REFERENCIAS	57
43. ÍNDICES DE ARIDEZ	57
43.1 ÍNDICE DE ARIDEZ DE LANG	57
43.2 ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE	58
44. OLAS DE FRÍO	59
44.1 DURACIÓN	59
44.1 INTENSIDAD MEDIA	59
44.1 INTENSIDAD MÁXIMA	59
REFERENCIAS	59
45. OLAS DE CALOR	59
45.1 DURACIÓN	60
45.2 INTENSIDAD MEDIA	60

45.3 INTENSIDAD MÁXIMA	60
REFERENCIAS	60
46. ÍNDICES BIOCLIM	60
47. ÍNDICES VITÍCOLAS	62
47.1 TEMPERATURA MEDIA EN EL PERIODO VEGETATIVO	62
47.2 TEMPERATURA MÍNIMA EN EL PERIODO VEGETATIVO	63
47.3 TEMPERATURA MÁXIMA EN EL PERIODO VEGETATIVO	63
47.4 ÍNDICE DE FRÍO NOCTURNO	63
47.5 TEMPERATURA MÍNIMA DEL PERIODO DE REPOSO VEGETATIVO	64
47.6 ÍNDICE DE WINKLER	64
47.7 GRADOS-DÍA BIOLÓGICAMENTE EFECTIVOS	65
47.8 ÍNDICE HELIOTÉRMICO DE HUGLIN	65
47.9 ÍNDICE DE BRANAS, BERNON Y LEVADOUX	66
47.10 ÍNDICE DE FREGONI SIMPLIFICADO	67
REFERENCIAS	67

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es la Descripción de las variables climáticas estudiadas en el ámbito del proyecto “Elaboración de escenarios locales y regionales de cambio climático adaptados al sexto informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) y su difusión a través de las tecnologías de la información y la comunicación” de la Junta de Andalucía.

En lo que sigue veremos una descripción de cada una de las variables y de la forma en que han sido calculadas para así facilitar tanto la reproducibilidad de los cálculos realizados como la comprensión de los resultados obtenidos al aplicar escenarios de cambio climático futuro sobre tales variables.

1. TEMPERATURA MÁXIMA

La Temperatura Máxima Media para cada periodo y rango temporal - donde los rangos temporales considerados han sido tanto el anual como el estacional y el mensual - se ha obtenido calculando el promedio de las temperaturas máximas diarias del periodo en cuestión para cada año del rango temporal específico y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal. Por ejemplo, para el periodo 1961 - 1990 se toman, para cada uno de los 30 años considerados, los datos diarios asociados al rango temporal de interés (anual, estacional o mensual), y se calcula el promedio de todo ese periodo.

En este estudio en particular, una vez obtenidos los valores en los observatorios se ha procedido a interpolar la variable a una resolución de 200 metros utilizando la altitud como covariable.

2. TEMPERATURA MÍNIMA

La Temperatura Mínima Media para cada periodo y rango temporal - donde los rangos temporales considerados han sido tanto el anual como el estacional y el mensual - se ha obtenido haciendo el promedio de las temperaturas mínimas diarias del periodo en cuestión para cada año del rango temporal y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal. Por ejemplo, para el periodo 1961 - 1990 se toman, para cada uno de los 30 años considerados, los datos diarios asociados al rango temporal de interés (anual, estacional o mensual), y se calcula el promedio de todo ese periodo.

En este estudio en particular, una vez obtenidos los valores en los observatorios se ha procedido a interpolar la variable a una resolución de 200 metros utilizando la altitud como covariable.

3. PRECIPITACIÓN

La precipitación acumulada para cada periodo y rango temporal - donde los rangos temporales considerados han sido tanto el anual como el estacional y el mensual - se ha obtenido haciendo el sumatorio de la precipitación diaria del periodo en cuestión para cada año del rango temporal y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal. Por ejemplo, para el periodo 1961 - 1990 se toman, para cada uno de los 30 años considerados, los datos diarios asociados al rango temporal de interés (anual, estacional o mensual), y se calcula el promedio de todo ese periodo.

En este estudio en particular, una vez obtenidos los valores en los observatorios se ha procedido a interpolar la variable a una resolución de 200 metros utilizando la altitud como covariable. La figura 3.1 muestra un ejemplo de un mapa obtenido mediante tal interpolación.

Precipitación Acumulada Anual Media 1985-2014 (mm)
ACCESS-CM2 (Historical)

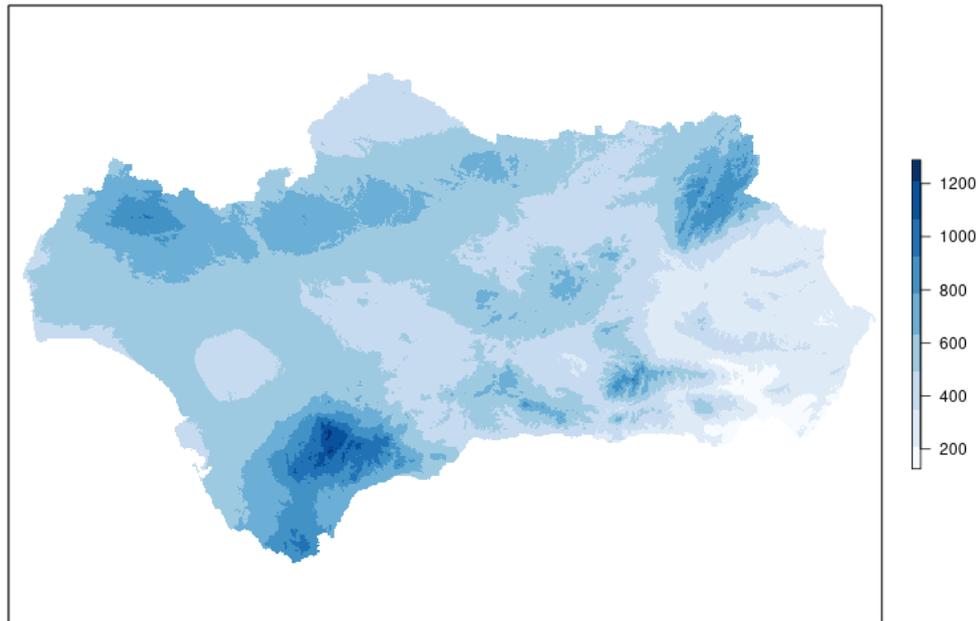


Figura 3.1 Resultado del promedio de precipitación anual para el periodo histórico 1985-2014 correspondiente a la simulación histórica del modelo ACCESS-CM2.

4. NÚMERO DE HELADAS

El número de heladas (en rigor, el número de días de helada) para cada periodo y rango temporal se ha obtenido como el sumatorio del número de días en los que la temperatura mínima es inferior a 0°C del periodo en cuestión para cada año del rango temporal considerado y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal.

5. OLAS DE CALOR

El número de olas de calor (en rigor, el número de días de calor anual) para cada periodo y rango temporal se ha obtenido como el sumatorio del número de días en los que la temperatura máxima diaria es superior a 40°C del periodo en cuestión para cada año del rango temporal considerado y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal.

6. OLAS DE CALOR EXTREMO

El número de olas de calor extremas (en rigor, el número de días de calor extremo anual) para cada periodo y rango temporal se ha obtenido como el sumatorio del número de días en los que la temperatura máxima diaria es superior a 45°C del periodo en cuestión para cada año

del rango temporal considerado y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal.

7. NOCHES TROPICALES

El número de noches tropicales para cada periodo y rango temporal se ha obtenido como el sumatorio del número de días en los que la temperatura mínima diaria es superior a 22°C del periodo en cuestión para cada año del rango temporal considerado y, de esta manera, obtener el valor medio de los años del rango temporal.

8. INTEGRAL TÉRMICA SOBRE 7.5°C

Por integral térmica entendemos una suma continua de valores por encima de un cierto umbral o entre dos valores, en este caso de temperatura. Dicha integral térmica se puede hacer de forma continua disponiendo de datos con una frecuencia casi continua, pero de forma general se desarrolla como un sumatorio de valores discretos (horarios, diarios, mensuales...) respecto del punto umbral base tomado como referencia. En nuestro caso, el cálculo se ha desarrollado a partir de datos diarios de la siguiente manera:

$$IT = \sum_{D1}^{Dn} (\bar{T} - T_o) \quad [\text{Ecuación 8.1}]$$

Donde “D1” es el primer día a tener en cuenta, “Dn” el día n final, “ \bar{T} ” es la temperatura media del día, y “ T_o ” la temperatura umbral. La unidad resultante será “°C/tiempo”, donde tiempo será la unidad temporal tomada como referencia (día, mes, año...). Hay que tener en cuenta que no se consideran las integrales negativas, por lo que todo valor de $\bar{T} < T_o$ debe ser despreciado o igualado a T_o para que la diferencia sea 0.

En el caso que nos ocupa, la integral térmica es una variable que define una acumulación de energía térmica en el medio vegetal, y su valor está correlacionado con la evolución fenológica de muchas especies. Como tal, se toma como umbral de referencia el valor de 7.5°C, temperatura a partir de la cual la fotosíntesis es potencialmente activa. El cálculo se ha realizado sobre todos los observatorios de temperatura disponibles y para todos los periodos temporales pasados y futuros requeridos, partiendo de la escala diaria disponible y agregando correspondientemente tanto a escala mensual como estacional y anual. Posteriormente, partiendo de los valores del índice en cada estación, se ha aplicado una interpolación mediante con la altitud como covariable sobre todo el territorio andaluz. La figura 8.1 muestra un ejemplo de cálculo de la integral térmica y de su posterior interpolación para la generación de un mapa.

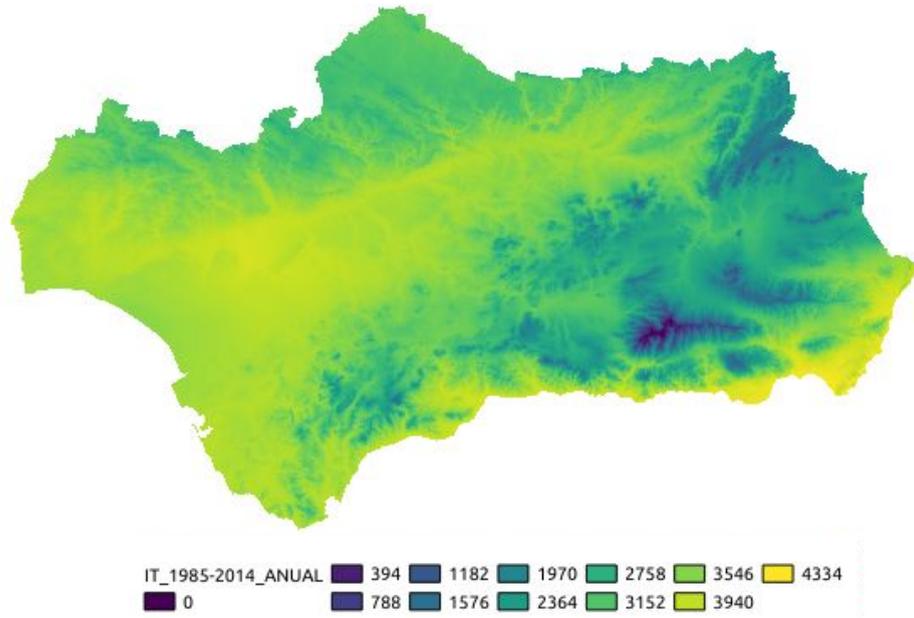


Figura 8.1 Resultado del promedio anual para el periodo histórico 1985-2014 correspondiente a la simulación histórica del modelo MPI-ESM2-MR.

9. GRADOS DÍA REFRIGERACIÓN

En este caso, al igual que en Integral Térmica antes definida, operamos con otra integral térmica, pero ahora aplicada al campo del confort climático humano. Para este índice desarrollamos una integral térmica en la que se toma como valor umbral $T_o = 25^{\circ}\text{C}$, aplicando la misma ecuación [8.1] a valores diarios.

Sólo nos servirán aquellos valores de temperatura media diaria mayores al umbral (25°C), siendo el resto despreciables en el cálculo. El resultado, pues, será un indicativo del “exceso” de calor acumulado en las épocas más cálidas del año, mostrando aquellas zonas con una mayor necesidad de refrigeración de sus infraestructuras para mantener el confort térmico. La figura 9.1 muestra un ejemplo de cálculo de los grados día refrigeración y de su posterior interpolación para la generación de un mapa.

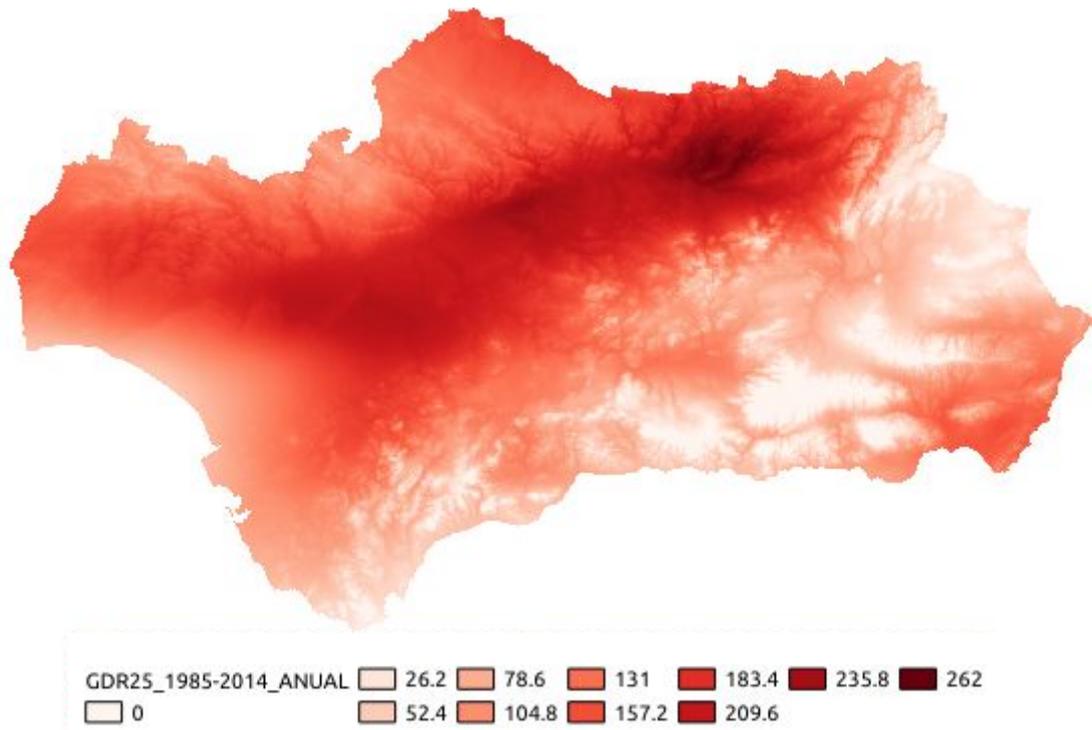


Figura 9.1 Resultado del promedio anual de los Grados Día Refrigeración para el periodo histórico 1985-2014 correspondiente a la simulación histórica del modelo MPI-ESM2-MR, medido en °C.

10. GRADOS DÍA CALEFACCIÓN

De forma similar al caso previo, operamos con una integral térmica relativa al confort climático humano, tomando en este caso como valor umbral $T_o = 17^\circ\text{C}$. En este caso hay una pequeña variación respecto a la ecuación [8.1]; al tomar una cota superior que no exceder (en lugar de una inferior sobre la que sumar), la diferencia será negativa, por lo que tomamos valores absolutos (simplemente por mostrar valores positivos al final):

$$IT = \sum_{D1}^{Dn} (|\bar{T} - T_o|) \quad [\text{Ecuación 10.1}]$$

Sólo nos servirán aquellos valores de temperatura media diaria inferiores al umbral (17°C), siendo el resto despreciables en el cálculo. El resultado, pues, será un indicativo del “déficit” de calor sobre los valores que se considerarían óptimos en términos de confort en las épocas más frías del año, mostrando aquellas zonas con una mayor necesidad de calefacción en sus infraestructuras. La figura 10.1 muestra un ejemplo de cálculo de los grados día calefacción y de su posterior interpolación para la generación de un mapa.

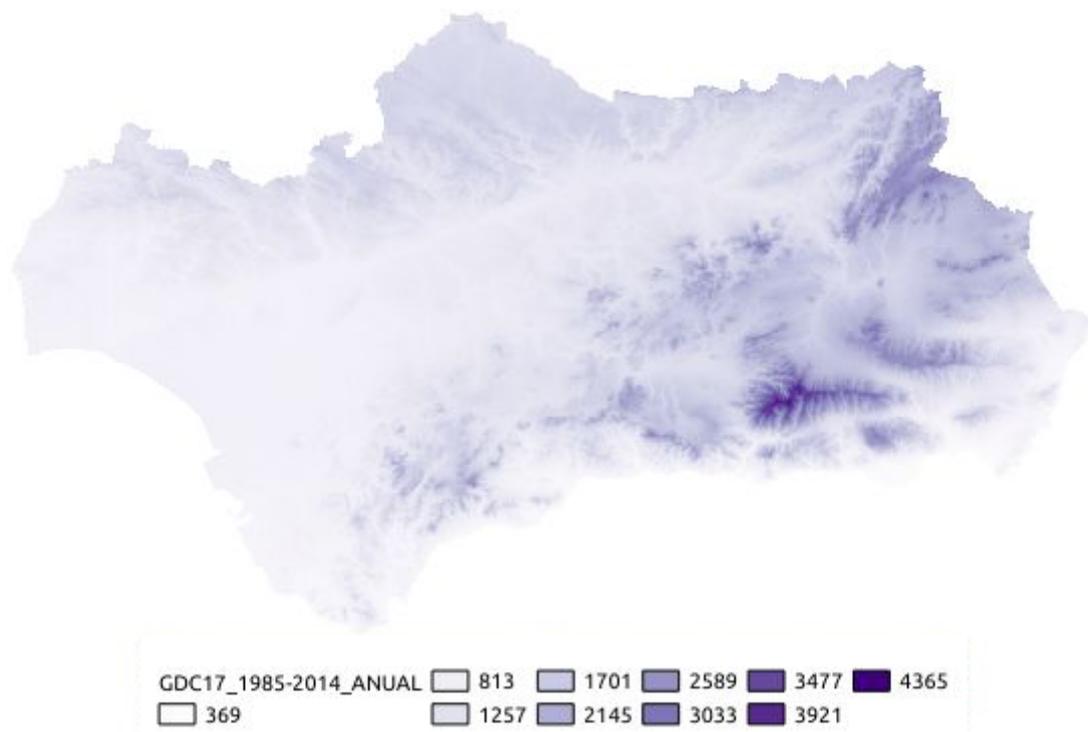


Figura 10.1 Resultado del promedio anual de Grados Día Calefacción para el periodo histórico 1985-2014 correspondiente a la simulación histórica del modelo MPI-ESM2-MR, medido en °C.

11. PRECIPITACIÓN DE NIEVE

La precipitación de nieve hace referencia al número de litros de agua por metro cuadrado en forma de nieve caídos a lo largo de un año. Para calcular esta variable se ha presupuesto que la nieve caída es igual a toda la precipitación caída bajo un cierto rango de temperaturas. Esas temperaturas consideradas han sido la temperatura media de las máximas y la temperatura media de las mínimas. La forma de aplicar tales temperaturas ha sido considerar, por analogía, que tales son la temperatura máxima y la temperatura mínima de un cierto día tipo promedio dado, y que la distancia temporal entre tales temperaturas (en horas, en un día tipo) es la máxima entre tales temperaturas (es decir, 12 horas en tal día tipo), de tal manera que

1. Si tanto la temperatura máxima como la mínima son menores de 0°C, toda la precipitación se considera caída en forma de nieve.
2. Si tanto la temperatura máxima como la mínima son mayores de 0°C, toda la precipitación se considera caída en forma de lluvia (y por lo tanto no hay nieve).
3. Si la temperatura mínima es menor de 0°C y la temperatura máxima es mayor de 0°C, la precipitación caída en forma de nieve será la proporcional al área existente en la zona de valores negativos que hay en la recta que une una temperatura mínima y máxima (recordemos, separadas por 12 horas en un día tipo).

A partir de este dato anual se ha calculado el promedio de cada periodo temporal de estudio. Esta variable se ha calculado a través de los ráster de precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual.

12. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

A la hora de poder caracterizar las particularidades climáticas de cada localización, 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 sólo la precipitación del lugar, sino también las pérdidas potenciales de agua que puede sufrir el suelo por evapotranspiración en condiciones ideales, las cuales a su vez dependen en gran medida de la radiación solar entre muchos otros factores.

Para poder estimar dicha pérdida se usa la “evapotranspiración de referencia (ET_o)”, que puede ser aproximada de diversas formas, algunas más precisas (y exigentes en datos) que otras. En nuestro caso, el modelo “Penman-Monteith FAO98” es el método más preciso para calcular la ET_o. Se trata de una función compleja y dependiente de multitud de variables, basado en principios de la física clásica y deducido a partir del modelo físico de conservación de energía. En éste están implicados todos los flujos de intercambio energético de la 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. Para fijar unas condiciones estándar de medición en su aplicación, se aproxima el suelo al de un cultivo de 0.12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0.23 de albedo. Sus unidades de medida son los “mm”.

Ateniéndonos a la definición pues de la ET_o según Penman-Monteith, tendríamos que:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot v_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v_2)} \quad [\text{Ecuación 12.1}]$$

siendo:

ET_o = evapotranspiración de referencia, Δ = pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/°C), *Rn* = radiación solar neta sobre la superficie (MJ/m²·dia), *G* = flujo de calor hacia el suelo (MJ/m²·dia), γ = constante psicrometría (kPa/°C), *T* = temperatura media del aire (°C), *v₂* = velocidad media del viento (m/s), *e_a* = presión de vapor actual (kPa), *e_s* = presión de vapor saturado (kPa).

Cabe destacar que el cálculo de la ET_o desarrollado aquí va un paso más allá del definido como estándar, ya que el término *Rn*, correspondiente a la radiación neta que incide sobre la superficie de estudio, no se aproxima como incidente sobre una superficie plana, sino que se ha introducido un coeficiente corrector para ajustarla a la topografía real, contando con la pendiente del suelo y su orientación, factores críticos en la ET_o real de una zona. Así:

$$Rn = (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{2 + \alpha \cdot (1 - \cos p)}{2} \right) \cdot R_s \cdot \frac{s_n}{s_{hn} \cdot \cos p} - R_{ol} \quad [12.2]$$

siendo:

s_n = la incidencia solar, y s_{hn} = la incidencia solar normalizada.

Así, aplicando las ecuaciones previas en cada punto de rejilla estipulado sobre Andalucía, , para la obtención del valor de ETo hemos hecho uso como valores de entrada de todas aquellas variables requeridas para su uso directo o indirecto (en algunos coeficientes), siendo: las temperaturas **TMax** y **Tmin**, la temperatura de rocío (**TDew**), la presión atmosférica reducida al nivel del mar (**PSL**), el viento estimado a 2m (**U2**), la altitud de cada punto (**Z**) y su latitud, la incidencia solar (**Sn**) y la pendiente del suelo (**p**). Dichas variables se han obtenido de diferentes fuentes:

- Tmax y Tmin son tomadas directamente de cada uno de los modelos climáticos, previa corrección y downscaling de sus valores de la rejilla nativa a la de Andalucía.
- TDew, PSL y U2 se han considerado, debido a su naturaleza, como valores constantes climáticos, aproximados para cada escala temporal deseada con el valor medio (media mensual, media anual, etc.). Sus valores medios se han obtenido mediante el uso del reanálisis ERA5-Land tomando como periodo de referencia el intervalo 1985-2014.
- Z se ha obtenido directamente del DTM con la rejilla equivalente a la usada.
- La Incidencia Solar y la Pendiente está obtenida como propio producto de la Junta de Andalucía (REDIAM) en una rejilla de 10x10m, y reescalada a 200x200m para corresponderse con la empleada en este proyecto.

La figura 12.1 muestra un ejemplo de Evapotranspiración de referencia obtenido para este proyecto, un mapa de tal variable para toda Andalucía.

Nota: el reanálisis ERA5-land, un reanálisis del pasado creado por el European Center for Medium Weather Forecast (ECMWF) puede ser descargado gratuitamente gracias a la iniciativa europea Copernicus. Para más información, véase

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>
<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>

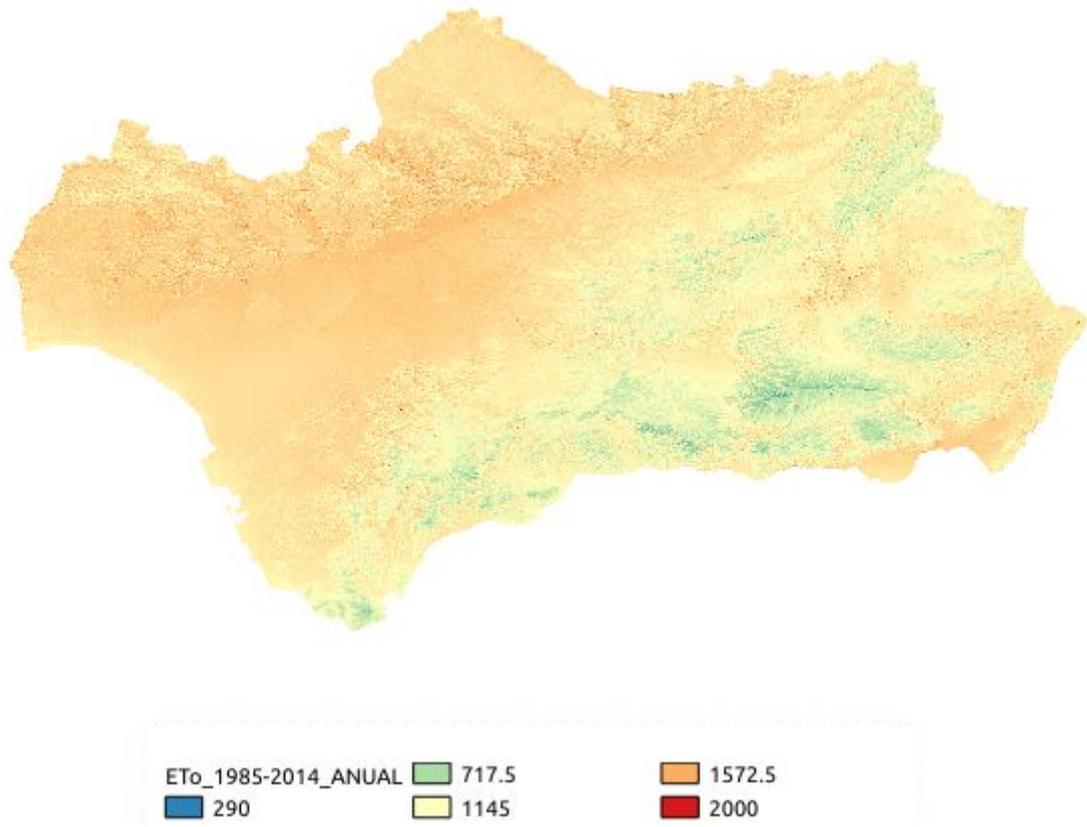


Figura 12.1. Evapotranspiración de referencia anual del periodo 1985-2014 del escenario histórico del modelo climático MPI-ESM2-MR.

13. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico mensual permite aproximar la disponibilidad de agua en el suelo mediante, en nuestro caso y de una forma muy simplificada, el cómputo de la precipitación entrante y de la evapotranspiración. El balance hídrico aquí usado es entonces potencial y sólo dependiente del clima. Para ello se considera también que el suelo tiene una capacidad de reserva hídrica “infinita”, sin tope de almacenamiento. Si el suelo pierde toda su reserva, el $BH = 0$, sin tomar valores negativos.

El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$BH_m = BH_{m-1} + Pr_m - ETo_m \Leftrightarrow BH_m > 0 \quad [Ecuación 13.1]$$

Donde BH_m es el balance hídrico del mes m , Pr_m y ETo_m son la precipitación total y la evapotranspiración de referencia del mes m , y BH_{m-1} el balance hídrico del mes anterior. Sus unidades son “mm”.

El cálculo del BH normalmente se inicia en el comienzo del Año Hidrológico (que varía según la zona), siendo en Andalucía el mes de septiembre. Aquí se considera que el suelo está carente de toda humedad, por lo que $BH_{m-1} = 0$ en todo el territorio. A partir de aquí se ha ido calculando mes a mes el valor correspondiente, cuidando de que en los casos que BH tome valores negativos se iguale a cero, tomando los valores de precipitación total estimada cada mes por los modelos climáticos y la ETo correspondiente previamente calculada. El balance hídrico anual se suele considerar como la disponibilidad media anual de agua y se calcula como la media del balance hídrico en todo el año. A partir de esta variable climática es posible inferir multitud de nuevos índices, descritos más adelante.

Con el fin de mostrar dos ejemplos de la evolución de BH a lo largo del año, se enseñan a continuación los valores medios de BH para el periodo 1960-1990 en el mes de agosto (figura 13.1) y de diciembre (figura 13.2).

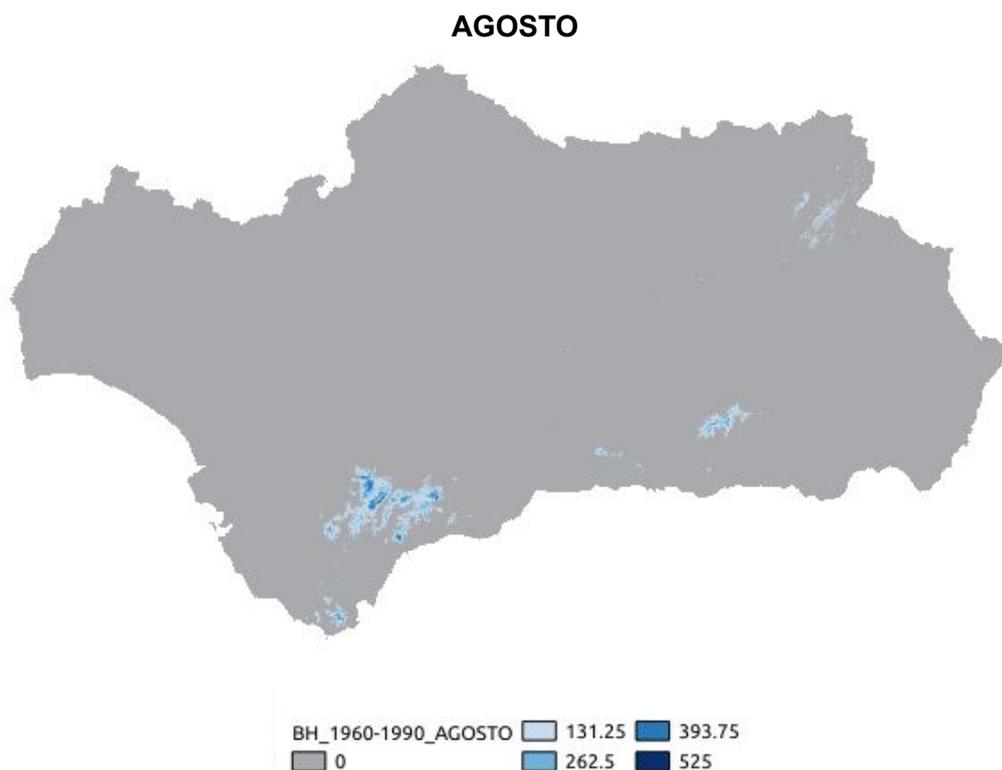


Figura 13.1 Balance Hídrico del mes de agosto para el periodo 1960 - 1990.

DICIEMBRE

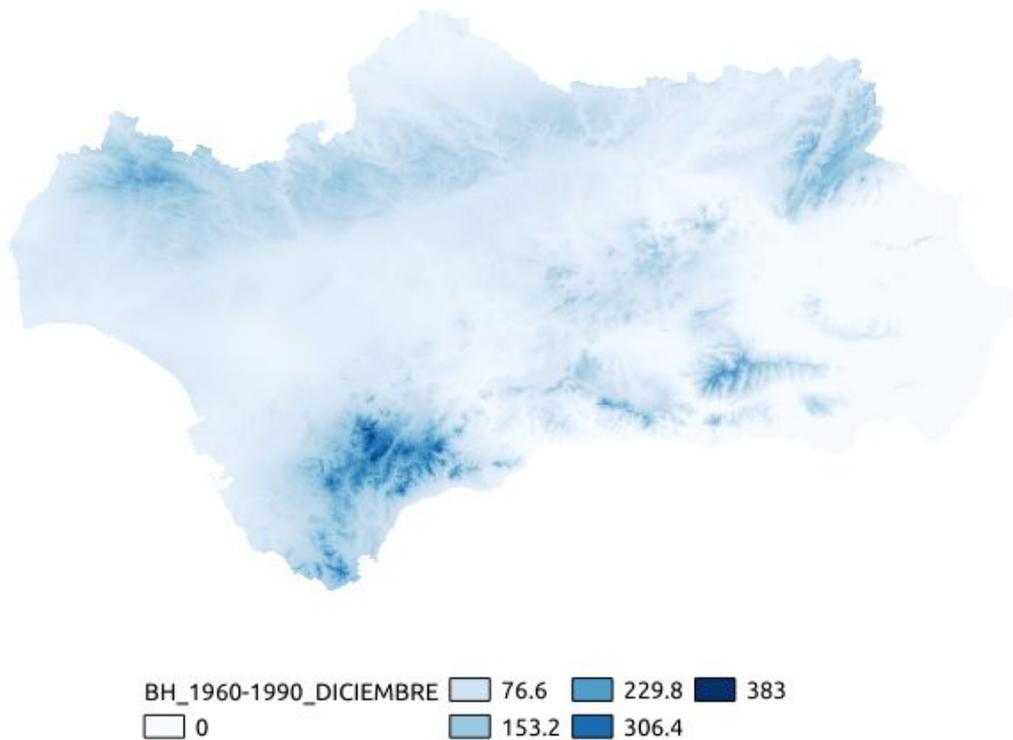


Figura 13.2 Balance Hídrico del mes de diciembre para el periodo 1960 - 1990.

14. POTENCIAL FOTOSINTÉTICO

El Potencial Fotosintético es otro de los indicadores que permite estudiar el comportamiento fenológico de las plantas a partir de la acumulación de temperatura del entorno. Está definido, como IT, con una integral térmica delimitada, en este caso, al rango de temperatura entre los 7.5 °C y los 35 °C, que es la horquilla de temperatura donde la producción de clorofila y la actividad fotosintética es máxima. Además, para que pueda tener lugar la fotosíntesis, se requiere de un aporte constante de humedad, por lo que el cálculo del PF viene supeditado a la presencia de humedad en el suelo, factor dado por la relación entre la ETo la ETr.

En este caso, debido a que aquí ya no podemos operar sobre los observatorios (como en IT o GDR) al manejar rasters como la ETo, el cálculo se ha realizado sobre cada punto de la malla y directamente a escala mensual, aproximando el PF tomando el valor de temperatura media mensual y multiplicando por el n° de días del mes en cuestión.

En función de dónde se ubiquen los valores mensuales de temperatura respecto a los umbrales preestablecidos, la expresión para el cálculo del PF quedaría:

$$\text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (T_{max} > U_x) \quad \rightarrow \quad PF = \frac{(U_x - U_m)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} \cdot \Delta$$

$$\begin{aligned}
\text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (U_m < T_{max} < U_x) &\rightarrow PF = \frac{(T_{max} - U_m) \cdot (T_{max} + U_m - 2 \cdot T_{min})}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} \cdot \Delta \\
\text{si } (U_m < T_{min} < U_x) \text{ y } (T_{max} > U_x) &\rightarrow PF = \frac{(U_x - T_{min}) \cdot (U_x + T_{min} - 2 \cdot U_m)}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} \cdot \Delta \\
\text{si } (U_m < T_{min} < U_x) \text{ y } (U_m < T_{max} < U_x) &\rightarrow PF = \frac{(T_{max} + T_{min} - 2 \cdot U_m)}{2} \cdot \Delta \\
\text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (T_{max} < U_m), \text{ ó, } (T_{min} > U_x) \text{ y } (T_{max} > U_x) &\rightarrow PF = 0
\end{aligned}$$

[Ecuación 14.1]

siendo:

T_{min} = la temperatura mínima media del mes ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} = la temperatura máxima media del mes ($^{\circ}\text{C}$), U_m = umbral mínimo de cálculo (7.5°C), U_x = umbral máximo de cálculo (35°C),

con Δ siendo el factor corrector para la PF que relaciona la ETr y la ETo de la siguiente manera:

$$\Delta = \frac{ETr}{ETo} \cdot N_{días} \quad \text{[Ecuación 14.2]}$$

Es decir, PF es la integral térmica durante un periodo de N días resultante de la diferencia entre las temperaturas mínima y máxima, y los umbrales de 7.5°C y 40°C , con los condicionantes de que la relación entre ETr y ETo sea positiva. Sus unidades serán “ $^{\circ}\text{C}/\text{tiempo}$ ”, con valores anuales desde 0 a $3600^{\circ}\text{C} \cdot \text{año}$.

De forma paralela se puede modificar el factor Δ incluyendo el fotoperiodo (horas de luz útiles de cada día), de la siguiente forma:

$$\Delta_{fp} = \frac{ETr}{ETo} \cdot N_{días} \cdot fp \quad \text{[Ecuación 14.3]}$$

De esta manera incluimos la variación mensual de las horas de luz, obteniendo un valor más fidedigno del PF real al captar las horas útiles de cada día para la actividad fotosintética. Sus unidades serán “ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{horas} \cdot \text{tiempo}$ ”, con valores anuales desde 0 a $43.200^{\circ}\text{C} \cdot \text{hora} \cdot \text{año}$.

Del mismo modo que con anterioridad, se adjunta un ejemplo de PF (sin fotoperiodo) para el periodo histórico con el fin de mostrar los valores de PF y su representación sobre Andalucía (figura 14.1).

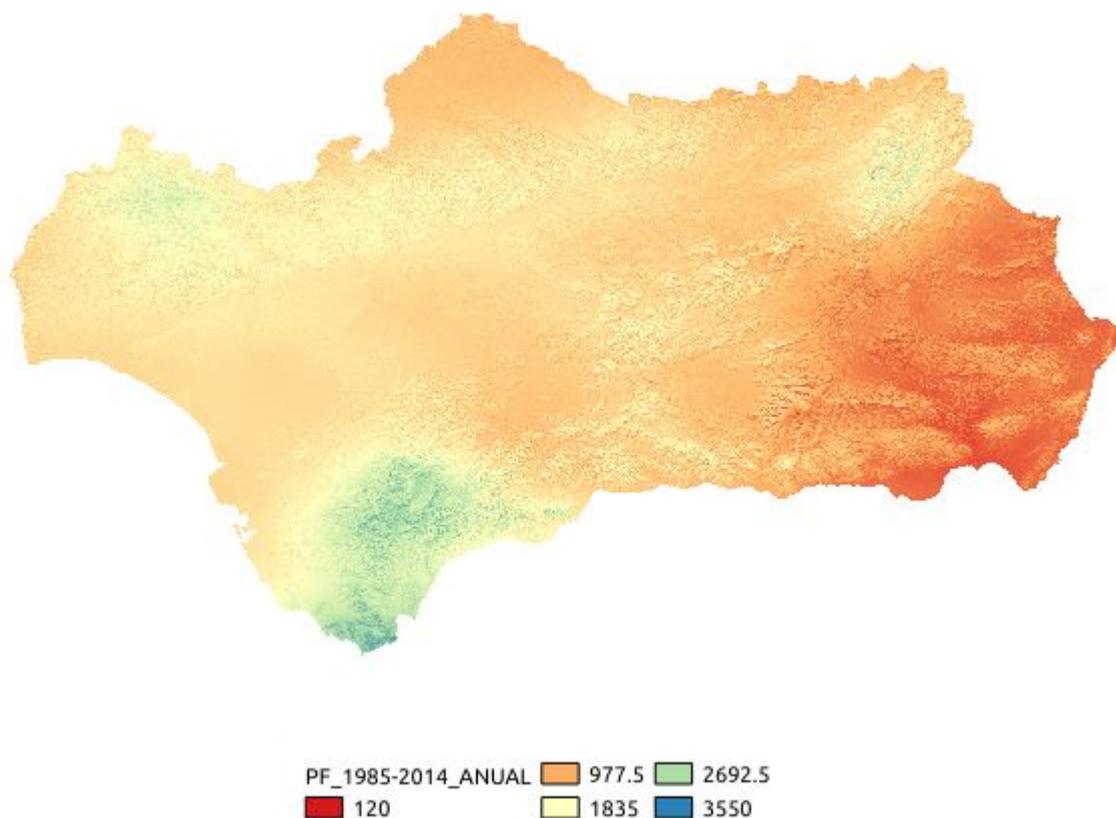


Figura 14.1 Potencial Fotosintético Anual para el periodo 1985 - 2014.

15. ÍNDICE DE CONTINENTALIDAD COMPENSADO

El Índice de Continentalidad Compensado es un índice térmico que considera la distribución anual de las temperaturas. Se ha calculado para cada observatorio restando la temperatura máxima anual a la temperatura mínima para luego sumarle la altitud del observatorio multiplicado por un coeficiente. Es decir, se ha calculado mediante la siguiente expresión:

$$ICC = T_{max} - T_{min} + Coef * Altitud\ Obs$$

Donde Tmax es la temperatura máxima anual y Tmin la temperatura mínima anual, Coef es coeficiente, en este caso de valor 0.006, altitud representa el valor sobre el nivel del mar del observatorio en cuestión.

Esta variable se ha calculado utilizando los raster generados de temperatura máxima y mínima media anual, y utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) a 200 metros de resolución de referencia del proyecto.

16. ÍNDICE DE TERMICIDAD

El 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 la temperatura media anual, la temperatura media de las mínimas del mes más frío y la temperatura media de las máximas del mes más frío. De manera que:

$$It = (T + m + M) * 10$$

Donde T es la temperatura media anual, m es la temperatura media de las mínimas del mes más frío, y M es la temperatura media de las máximas del periodo mensual más frío.

Este índice se ha calculado a través de los raster de las variables previamente citadas.

17. ÍNDICE DE TERMICIDAD COMPENSADO

El Índice de Termicidad Compensado trata de ponderar el valor del índice de termicidad, 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. De tal forma:

$$Itc = ((T + m + M) * 10) + Ci$$

Donde T es la temperatura media anual, m es la temperatura media de las mínimas del mes más frío, y M es la temperatura media de las máximas del periodo mensual más frío y Ci es un factor corrector para compensar el exceso de frío en las áreas extratropicales.

Si el índice de continentalidad (ICC) está comprendido entre 8 y 18, el valor del IXTC se considera igual al del It (ICC = IXTC). 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). IXTC= IXT ± C.

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

En los climas extratropicales continentales o semicontinentales (ICC > 18.0), el valor de compensación (C) se suma al índice de termicidad: IXTC = IXT + Ci.. Este valor de compensación se calcula según sea la cifra del índice de continentalidad (ICC). Así, cuando la continentalidad es moderada (18.0 < ICC <= 21.0), el valor de compensación (C1) se obtiene multiplicando por f1 (f1 = 5) el resultado de la sustracción entre el ICC de la estación y 18. Cuando la continentalidad es acusada (ICC > 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: $IXTC = XT + (C1 + C2 + C3 + C4)$.

18. TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS CÁLIDO

Este índice se ha valorado de manera anual. Se ha tomado el valor de la temperatura media diaria del mes en el que se ha registrado la máxima de las temperaturas máximas medias mensuales. Se ha calculado el valor para cada observatorio y, a continuación, se ha interpolado utilizando la altitud como covariable.

19. TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS FRÍO

Este índice se ha valorado de manera anual. Se ha tomado el valor de la temperatura media diaria del mes en el que se ha registrado la mínima de las temperaturas mínimas medias mensuales. Se ha calculado el valor para cada observatorio y, a continuación, se ha interpolado utilizando la altitud como covariable.

20. TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES MÁS FRÍO

Esta variable se ha obtenido de manera anual. Se han valorado las temperaturas mínimas medias mensuales y de estos valores se ha tomado el mínimo, que para el caso de Andalucía se trata del mes de Enero. Se ha calculado el valor para cada observatorio y, a continuación, se ha interpolado utilizando la altitud como covariable.

21. TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÁXIMAS DEL MES MÁS CÁLIDO

Esta variable se ha obtenido de manera anual. Se han valorado las temperaturas máximas medias mensuales y de estos valores se ha tomado el máximo, que para el caso de Andalucía se trata del mes de Julio. Se ha calculado el valor para cada observatorio y, a continuación, se ha interpolado utilizando la altitud como covariable.

22. INDICE OMBROTÉRMICO

El Índice Ombrotérmico es un indicador que relaciona precipitación y temperatura con el fin de ayudar a establecer una relación entre vegetación y clima, una clasificación bioclimática. Relaciona la lluvia total mensual y la temperatura media mensual sólo en aquellos meses donde ambos tienen un valor positivo (>0), creando un escenario propicio para el desarrollo y

crecimiento de la vegetación. Se mide en mm/°C y sus resultados se clasifican en 7 categorías, tomando valores en Andalucía normalmente entre 0 y 10 (de clima tipo hiperárido a húmedo).

El Índice Ombrotérmico se calcula mediante el desarrollo de la siguiente expresión:

$$Io = 10 \cdot \frac{Pr}{\bar{T}} \Leftrightarrow Pr, \bar{T} > 0 \text{ [x]}$$

siendo, como ya se ha mencionado, Pr = precipitación total mensual, y \bar{T} = temperatura media del mes (siendo ambos siempre positivos).

Este índice se ha calculado mediante los raster de precipitación mensual y de temperatura media de los valores medios de los rangos temporales de estudio. Se adjunta aquí a modo de ejemplo de los resultados obtenidos en Andalucía una imagen (figura 22.1) de los mismos para el periodo histórico del ACCESS-CM2.

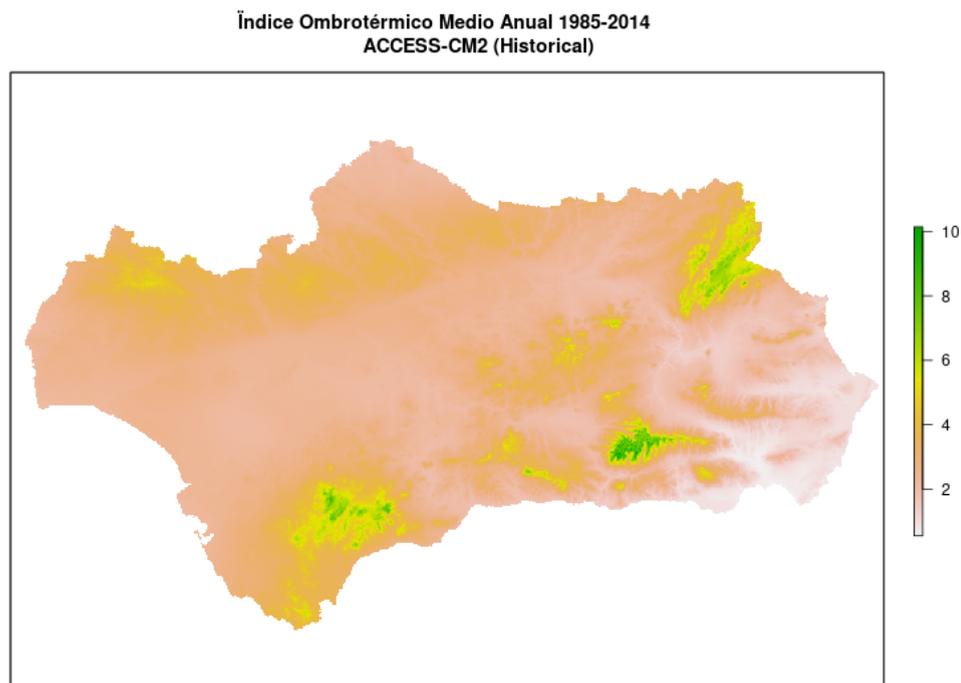


Figura 22.1 Índice Ombrotérmico medio anual para el periodo 1985 - 2014 calculado para el escenario Histórico del modelo climático ACCESS-CM2.

23. CCH: VOTO MEDIO ESPERADO DIURNO Y NOCTURNO

El Voto Medio Esperado (PMV: *Predicted Mean Vote*; PMVd para el valor diurno y PMVn para el nocturno) 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 (Tabla 23. 1).

PMV	Sensación térmica
+3	Mucho calor
+2	Bastante calor
+1	Algo de calor
0	Neutra
-1	Algo de frío
-2	Bastante frío
-3	Mucho frío

Tabla 23.1. Valores posibles de índice PMV y sensación térmica asociada a cada caso.

Para el cálculo del PMV se considera el modelo de P. O. Fanger (Thermal Comfort, McGraw-Hill, 1973), por ser el método que contempla mayor número de parámetros en una metodología que combina una formulación física basada en un balance energético y otra probabilística 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. Es necesario considerar las limitaciones del método en cuanto a su aplicabilidad. Según las recomendaciones de la norma ISO 7730 "Ergonomía del ambiente térmico", el índice del Voto medio estimado (PMV) sólo debería utilizarse para evaluar ambientes térmicos en los que las variables implicadas en el cálculo permanecieran comprendidas dentro de los siguientes intervalos: tasa metabólica comprendida entre 0.8 y 4 met, aislamiento de la ropa entre 0 y 2 clo, temperatura del aire entre 10°C y 30°C, temperatura radiante media entre 10°C y 40°C, velocidad del aire entre 0 y 1 m/s y presión de vapor de agua entre 0 y 2700 Pa (Diego-Mas, 2015).

La fórmula para el cálculo de los índices PMV mediante Fanger es muy compleja y por ello su aplicación mediante técnicas de computación resulta laboriosa, por lo que al no haberse

hecho uso directo de la misma no se especifica aquí. En su lugar, se ha empleado el paquete de cálculo “COMF” desarrollado en el lenguaje informático R de libre acceso y la función calcPMVadj (Schweiker et al., 2021), función que calcula el índice PMV ajustado considerando el efecto de enfriamiento de la velocidad elevada del aire, consiguiendo así valores más realistas para situaciones al aire libre (permitiendo valores de velocidad del aire superiores a 0.2m/s).

Las variables de entrada de la función empleada son temperatura del aire (°C), temperatura radiante media (considerada como el mismo valor que la temperatura del aire, °C), velocidad del aire (m/s), humedad relativa (%), nivel de aislamiento de la ropa (clo), tasa metabólica (met) y trabajo externo o potencia mecánica efectiva (met).

Los valores de temperatura del aire corresponden con los obtenidos para cada uno de los modelos corregidos anteriormente en cada observatorio. Como distinción entre valores diurnos y nocturnos, se considera la temperatura máxima para obtener PMVd, mientras que en el caso de pmvn se emplea temperatura mínima. Por otro lado, la velocidad del viento y la humedad relativa son tomados como constantes, obtenidos calculando la media de los valores del periodo 1985-2014 de ERA5-Land en los puntos de malla más próximos a cada observatorio. En el caso de la velocidad del viento no es posible distinguir entre valor “diurno” y nocturno”, así que se emplea el valor medio diario en ambos, suponiendo así un valor constante. Sin embargo, para la humedad relativa sí es posible realizar esta distinción, empleando humedad relativa mínima para el cálculo de pmvd y humedad relativa máxima para el cálculo de pmvn. El valor de tasa metabólica es fijado en 110 W/m^2 (equivalente a aproximadamente 1.9 met), correspondiendo con una actividad de una persona caminando en llano y la eficiencia mecánica es definida como un 20%, de forma que el trabajo externo (también denominado potencia mecánica efectiva corresponde con el 20% de la tasa metabólica, es decir un valor constante de 22 W/m^2 (equivalente a aproximadamente 0.4 met) . Por último, el valor del nivel de aislamiento de la ropa presenta un valor fijo para cada mes del año y, a su vez, realiza una distinción entre “diurno” y “nocturno” (Tablas 23.2 y 23.3).

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_{cl} diurno (clo)	1.5	1.2 0	1.0 0	1.0 0	0.6 5	0.5 0	0.3 0	0.2 0	0.3 0	1.0 0	1.2 0	1.5 0
I_{cl} nocturno (clo)	2.0 0	1.7 0	1.5 0	1.5 0	1.0 0	0.8 0	0.5 0	0.4 0	0.5 0	1.5 0	1.7 0	2.0 0

Tabla 23. 2. Valores de aislamiento de la ropa (en unidades clo)

TIPO DE VESTIMENTA	AISLAMIENTO TÉRMICO (clo)
Desnudo	0,0
En pantalón corto	0,1
Vestimenta tropical: pantalón corto, camisa manga corta y sandalias	0,3
Vestimenta de verano ligera: Pantalón largo ligero, camisa de manga corta, calcetines ligeros y zapatos	0,5
Vestimenta de trabajo.	0,7
Vestimenta de invierno ligera: Camisa de manga larga, pantalón grueso, jersey, calcetines gruesos, zapatos,	1,0
Vestimenta de invierno	1,5

Fuente: Norma UNE-EN ISO 9920 y Alberto Viti Corsi

Tabla 23. 3. Correspondencia de valores de aislamiento térmico de la ropa (en unidades clo) con el tipo de vestimenta correspondiente.

Fuente: https://www.idae.es/sites/default/files/articulos/bienestar_termico_en_un_espacio_climatizado.pdf

A continuación, se ha procedido a realizar la media entre los datos anuales del rango temporal de estudio.

Voto Medio Esperado Diurno Anual media 1985-2014
ACCESS-CM2 (Historical)

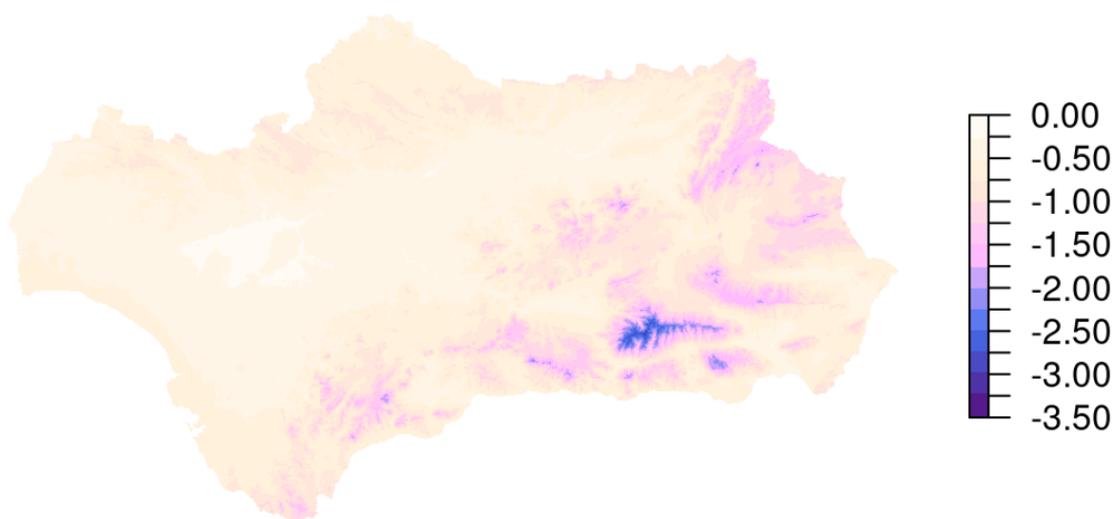


Figura 23.1. Ejemplo del Voto Medio Esperado Diurno Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

Voto Medio Esperado Nocturno Anual media 1985-2014
ACCESS-CM2 (Historical)

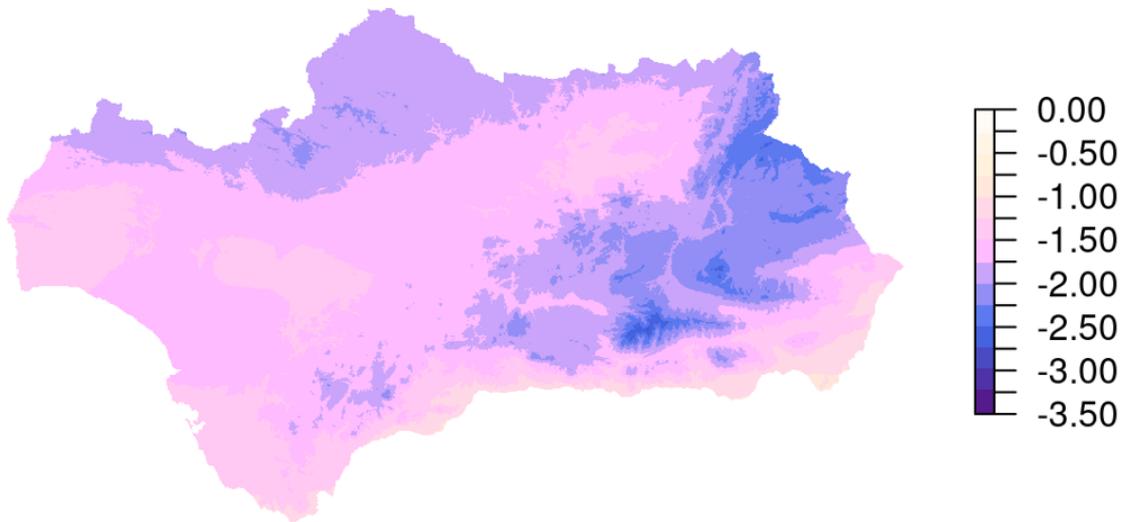


Figura 23. 2. Ejemplo del Voto Medio Esperado Nocturno Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

A raíz de los resultados obtenidos para el Voto Medio Esperado (PMV: *Predicted Mean Vote*) en el periodo histórico - valores medios inferiores a 0, indicando una sensación térmica media anual más bien fría - se realiza este análisis, con el objetivo de encontrar qué variable o variables de entrada puede o pueden estar influyendo en que la sensación térmica media anual en el territorio andaluz sea casi neutra, algo fría, bastante fría o muy fría y nunca alcanzando sensación de calor. Así, se realiza un estudio para analizar la relación de los resultados con variables de entrada que puedan resultar problemáticas, de forma que no se analiza la efectividad de la aplicación de este método en situaciones de exterior al ser un índice ideado para el confort térmico en espacios de interior.

Se cree que las variables de entrada que pueden estar influyendo de forma significativa en el resultado obtenido son la velocidad del aire y el nivel de aislamiento de la ropa; por ello, se seleccionan 3 observatorios (Tabla 23. 4) situados en localizaciones estratégicas, se varían ambas variables manteniendo el resto constantes y se analizan los valores obtenidos para el índice PMV diurno (PMVd). El periodo seleccionado para el análisis corresponde con el primer periodo histórico: 1961-1990.

Id Observatorio	nombre del observatorio	Municipio	Provincia	Altitud (m)
5639	Estepa	Estepa	Sevilla	515
5085	Cazorla, Nava de San Pedro	Cazorla	Jaén	1290
PG2	Refugio de Poqueira	Capileira	Granada	2510

Tabla 23. 4. Información básica sobre los observatorios seleccionados para este análisis.

Observatorio 5639

Se muestran las variables de entrada y el valor PMVd obtenido con los valores originales en la primera fila, con el valor de velocidad del viento modificado en la segunda fila y con el valor de aislamiento de la ropa modificado en la tercera fila. Así, para todos los casos.

- Cálculo anual

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
22.87	22.87	2.20	41.98	0.86	1.89	0.38	-0.51
22.87	22.87	1	41.98	0.86	1.89	0.38	-0.32
22.87	22.87	2.20	41.98	1	1.89	0.38	-0.27

Tabla 23. 5. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) anual obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5639.

- Cálculo mensual para el mes de julio

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
34.64	34.64	2.06	23.10	0.30	1.89	0.38	0.61
34.64	34.64	0.1	23.10	0.30	1.89	0.38	2.17
34.64	34.64	2.06	23.10	0.50	1.89	0.38	0.85

Tabla 23. 6. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para el mes de julio obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5639.

- Cálculo estacional para la estación invernal

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
13.65	13.65	2.13	56.38	1.40	1.89	0.38	-0.97
13.65	13.65	1.2	56.38	1.40	1.89	0.38	-0.85
13.65	13.65	2.13	56.38	1.60	1.89	0.38	-0.71

Tabla 23. 7. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para la estación de invierno obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5639.

Observatorio 5085

Se muestran las variables de entrada y el valor PMVd obtenido con los valores originales en la primera fila, con el valor del viento modificado en la segunda fila y con el valor de aislamiento de la ropa modificado en la tercera fila.

- Cálculo anual

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
16.19	16.19	1.65	41.09	0.86	1.89	0.38	-1.58
16.19	16.19	1.00	41.09	0.86	1.89	0.38	-1.40
16.19	16.19	1.65	41.09	1.00	1.89	0.38	-1.27

Tabla 23. 8. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) anual obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5085.

- Cálculo mensual para el mes de julio

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
28.97	28.97	1.90	20.70	0.30	1.89	0.38	-0.51
28.97	28.97	1.00	20.70	0.30	1.89	0.38	-0.26
28.97	28.97	1.90	20.70	0.50	1.89	0.38	-0.15

Tabla 23. 9. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para el mes de julio obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5085.

- Cálculo estacional para la estación de invierno

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
7.97	7.97	1.43	55.92	1.40	1.89	0.38	-1.66
7.97	7.97	0.50	55.92	1.40	1.89	0.38	-1.37
7.97	7.97	1.43	55.92	1.50	1.89	0.38	-1.49

Tabla 23. 10. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para la estación de invierno obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador 5085.

Observatorio PG2

Se muestran las variables de entrada y el valor PMVd obtenido con los valores originales en la primera fila, con el valor del viento modificado en la segunda fila y con el valor de aislamiento de la ropa modificado en la tercera fila.

- Cálculo anual

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
9.43	9.43	1.03	40.38	0.86	1.89	0.38	-2.64
9.43	9.43	0.50	40.38	0.86	1.89	0.38	-2.30
9.43	9.43	1.03	40.38	1.20	1.89	0.38	1.77

Tabla 23. 11. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) anual obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador PG2.

- Cálculo mensual para el mes de septiembre

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
13.33	13.33	0.96	34.36	0.30	1.89	0.38	-4.41
13.33	13.33	0.50	34.36	0.30	1.89	0.38	-3.77
13.33	13.33	0.96	34.36	1.00	1.89	0.38	-1.58

Tabla 23. 12. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para el mes de septiembre obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador PG2.

- Cálculo estacional para la estación de verano

t_a (°C)	t_r (°C)	v_a (m/s)	RH (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	V (met)	PMVd
16.54	16.54	1.01	27.69	0.33	1.89	0.38	-3.27
16.54	16.54	0.80	27.69	0.33	1.89	0.38	-3.09
16.54	16.54	1.01	27.69	0.70	1.89	0.38	-1.80

Tabla 23. 13. Valor de Voto Medio Esperado Diurno (PMVd) para la estación de verano obtenido empleando el modelo ACCESS-CM2 del CMIP6, junto con las variables de entrada empleadas en cada caso para el observatorio con identificador PG2.

Tal y como se ha postulado inicialmente, se encuentra una influencia significativa tanto de la velocidad del viento como del nivel de aislamiento de la ropa sobre el resultado obtenido de Voto Medio Esperado Diurno. Este resultado es evidente, al ser estas variables dos de las 7 variables de entrada; sin embargo, así puede entenderse la magnitud de la influencia que estas tienen sobre el valor obtenido de sensación térmica.

En primer lugar, como es de esperar, a mayor velocidad del viento, más fría es la sensación térmica que se percibe y viceversa. Este resultado se puede observar en todos los casos presentados, aunque es más destacable en la modificación de valores realizada para el observatorio de Sevilla en el mes de julio (Tabla 23. 6, segunda fila con respecto de la primera) al ser mayor la variación en el valor de la velocidad del viento, que en el caso original es de 2.06 m/s y se modifica a 0.1 m/s, obteniéndose valores de PMVd muy diferentes: de 0.61 y 2.17, respectivamente, indicando sensaciones térmicas de algo de calor y de bastante calor, respectivamente. En este caso y dado que este índice ha sido ideado para evaluar el confort térmico en espacios de interior, podría ocurrir que la influencia de la velocidad del viento se esté midiendo de forma incompleta.

En segundo lugar, de nuevo es coherente que a mayor aislamiento de la ropa, menos fría sea la sensación térmica percibida y viceversa. Este resultado puede observarse en todos los casos, aunque destaca en la modificación de valores del observatorio de Capileira, situado en Sierra Nevada (Tablas 23. 11, 12 y 13, tercera fila con respecto de la primera). Se detecta entonces un problema, pues los valores del nivel de aislamiento de la ropa son fijos mensualmente para todo el territorio andaluz, de forma que este valor es el mismo tanto para un observatorio situado en Estepa como para un observatorio situado en Capileira, resultando adecuado en el primer caso (localizaciones estándar) pero muy insuficiente en el segundo (localizaciones a gran altitud) al tener condiciones meteorológicas muy diferentes incluso dentro de un mismo mes. Es irreal considerar que en la estación de verano, por ejemplo, las personas lleven una vestimenta tropical (pantalón corto, camisa manga corta y sandalias -correspondiente con un nivel de aislamiento de 0.3 clo, (Tabla 23. 3)- en Capileira, con una temperatura media de unos 16.5°C. Es por ello que se obtiene una sensación térmica tan fría.

Por otro lado, los niveles fijados mensualmente de aislamiento de la ropa (Tabla 23. 2) resultan muy adecuados para las condiciones climáticas actuales en localizaciones estándar. Por ello, teniendo en cuenta que el ascenso de la temperatura media se lleva observando desde inicios del siglo XX y en España particularmente desde la década de los setenta de ese siglo (Moreno, 2014), cabe esperar que niveles de aislamiento térmico que actualmente podrían corresponder con sensaciones térmicas aproximadamente neutras en localizaciones estándar, obtuvieran sensaciones térmicas más frías en periodos pasados.

Se debe tener en cuenta todo lo anterior al considerar tanto la validez como la aplicabilidad del Voto Medio Esperado y, por lo tanto, también de los índices derivados del mismo: Índice de Insatisfacción Esperado y Horas de Insatisfacción Esperadas.

REFERENCIAS

Diego-Mas, Jose Antonio. Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015. [consulta 09-06-2022]. Disponible online: <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>

Moreno, J. M. (2014). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. *Boletín CF+ S*, (38/39), 37-56.

Schweiker, M., Mueller, S., Kleber, M., Kingma, B., Shukuya, M., Rahman, S. & Sarwar, S. (2021). *comf: Models and Equations for Human Comfort Research*. R package version 0.1.10.

24. CCH: ÍNDICE DE INSATISFACCIÓN ESPERADO DIURNO Y NOCTURNO

El índice de insatisfacción esperado corresponde con el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD: *Predicted Percentage of Dissatisfied*; PPDd para el valor diurno y PPDn para el nocturno) en el entorno térmico evaluado. Se obtiene considerando la metodología propuesta por P.O. Fanger, es dependiente del Voto Medio Esperado (PMV) y complementa la información proporcionada por el mismo. Este índice establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas térmicamente insatisfechas, suponiendo siempre un mínimo del 5% de personas insatisfechas (Diego-Mas, 2015).

Al depender del valor PMV, también dispone de una función en el paquete de cálculo en R de libre acceso “COMF”, *calcPPD*, función que es empleada para su obtención (Schweiker et al., 2021). Asimismo, las variables de entrada de la función empleada coinciden: temperatura del aire (°C), temperatura radiante media (considerada como el mismo valor que la

temperatura del aire, (°C), velocidad del aire (m/s), humedad relativa (%), nivel de aislamiento de la ropa (clo), tasa metabólica (met) y trabajo externo o potencia mecánica efectiva (met) (para más detalle consultar el índice PMV: índice 23).

A continuación, se ha procedido a realizar la media entre los datos anuales del rango temporal de estudio.

Índice de Insatisfacción Esperado Diurno Anual media 1985-2014
ACCESS-CM2 (Historical)

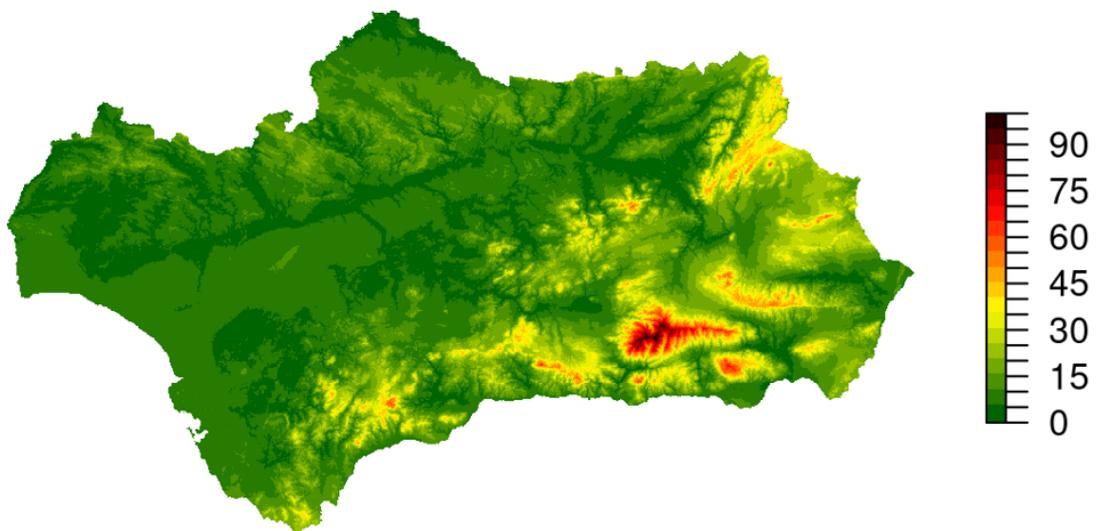


Figura 24. 1. Ejemplo del Índice de Insatisfacción Esperado Diurno Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

Índice de Insatisfacción Esperado Nocturno Anual media 1985-2014

ACCESS-CM2 (Historical)

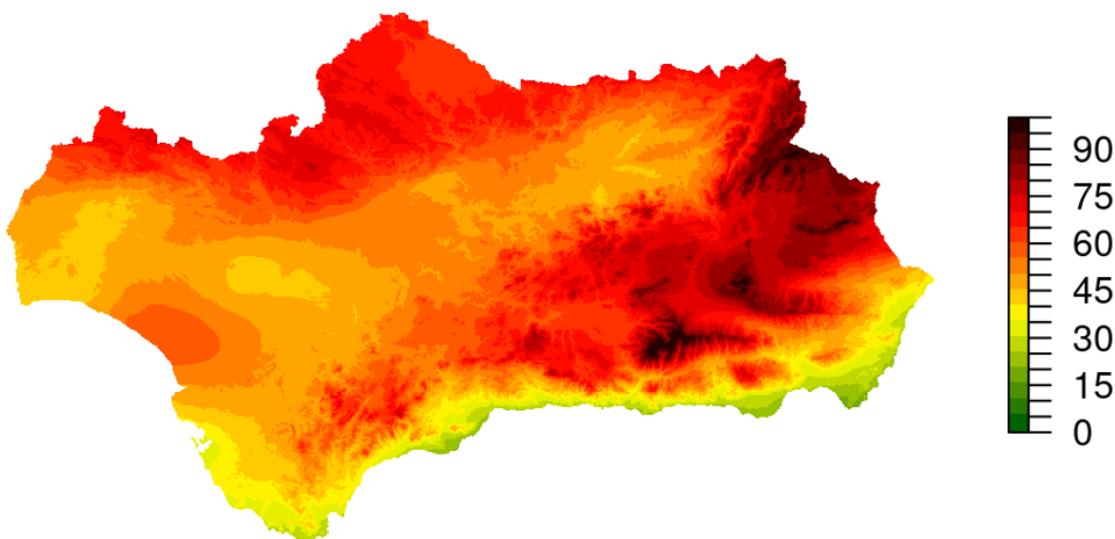


Figura 24. 2. Ejemplo del Índice de Insatisfacción Esperado Diurno Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

Como se ha mencionado anteriormente, se debe tener en cuenta los resultados obtenidos en el Voto Medio Esperado para analizar los obtenidos en el Índice de Insatisfacción Esperado (PPD), al ser este último un índice que depende del primero y complementar la información dada por él. En la media anual histórica para el periodo 1985-2014 del Voto Medio Esperado (PMV) se han obtenido todos los valores por debajo de 0, indicando una sensación térmica casi neutra, algo fría, bastante fría o muy fría y nunca alcanzando sensación de calor. Es por ello que en el índice actual, el Índice de Insatisfacción Esperado -que representa al porcentaje de personas insatisfechas en cuanto a sensación térmica-, los valores de porcentajes más altos se encuentran en las zonas situadas a mayor altitud, donde las temperaturas tanto máximas como mínimas son más bajas, pues sólo está haciendo referencia al porcentaje de personas insatisfechas por sensación térmica de frío: no se reflejan sensaciones térmicas de calor y, por lo tanto, no habría ningún porcentaje de personas insatisfechas por calor. Así pues, al partir del índice PMV -del cual no se obtienen resultados muy realistas dada la infraestimación de la sensación térmica-, el índice PPD muestra también resultados poco realistas, limitando su aplicabilidad.

Lejos de lo obtenido, se esperarían porcentajes de insatisfacción apreciables tanto en aquellas zonas donde la temperatura máxima media anual (índice 2) sea más alta por insatisfacción por sensación de calor, como donde la temperatura mínima media anual (índice 3) sea más baja por insatisfacción por frío.

REFERENCIAS

Diego-Mas, Jose Antonio. Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015. [consulta 09-06-2022]. Disponible online: <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>

Schweiker, M., Mueller, S., Kleber, M., Kingma, B., Shukuya, M., Rahman, S. & Sarwar, S. (2021). comf: Models and Equations for Human Comfort Research. R package version 0.1.10.

25. CCH: HORAS DE INSATISFACCIÓN ESPERADAS (51%) POR CALOR Y POR FRÍO

El número de Horas de Insatisfacción Esperadas por calor y por frío es obtenido mediante una metodología en desarrollo proporcionada por la Junta de Andalucía. Este índice es dependiente de los dos índices anteriores: PMV y PPD, tanto valores diurnos (referidos a temperatura máxima diaria) como nocturnos (referidos a temperatura mínima diaria).

Para llevar a cabo este método, en primer lugar se deben conocer las suposiciones de las que parte:

- 1) El índice se calcula a escala mensual suponiendo el día promedio de cada mes, en un espacio temporal que ocupa desde la hora de salida del sol del día promedio hasta la misma hora del día siguiente (24 h después).
- 2) El índice presenta un comportamiento estrictamente lineal entre punto y punto.
- 3) La temperatura mínima diaria se produce justo a la hora de salida del sol (h_{ss}) (tabla X), mientras que la temperatura máxima diaria es alcanzada x horas después de la salida del sol. Siendo x:

$$x = \frac{h_{ps} - h_{ss} + 4}{2}$$

Así:

$$h_{Tm\acute{a}x} = h_{ss} + x$$

Donde h_{ps} es la hora de la puesta del sol, h_{ss} es la hora de la salida del sol y $h_{Tm\acute{a}x}$ es la hora a la que se produce la temperatura máxima diaria.

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h_{ss}	8.5	8.0	7.5	8.0	7.0	7.0	7.0	7.5	8.0	8.5	8.0	8.5
h_{ps}	18.5	19.0	19.5	21.0	21.5	21.5	21.5	21.0	20.5	20.0	18.0	18.0

Tabla 25. 1. Hora de salida del Sol (h_{ss}) y puesta del Sol (h_{ps}) promedio para cada mes del año.

- 4) Se determina si el PPD es por calor o por frío atendiendo al valor de PMV respectivo. Si el valor PPD es superior al 51%, entonces se espera un número de horas de insatisfacción para la sensación térmica correspondiente. De esta forma:
- Si PMV diurno/nocturno (correspondiente a la hora en la que se produce la temperatura máxima diaria) es positivo o igual a cero y el PPD diurno/nocturno correspondiente es superior al 51%, hay un margen de horas de insatisfacción por calor.
 - Si PMV diurno/nocturno (correspondiente a la hora en la que se produce la temperatura mínima diaria) es negativo y el PPD diurno/nocturno correspondiente es superior al 51%, hay un margen de horas de insatisfacción por frío.

Teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, la metodología a seguir para el día promedio del mes seleccionado es: en un plano cartesiano en el que el eje de las abscisas representa el tiempo (h) y el eje de las ordenadas representa el PPD (%), se representa la evolución diaria del PPD. Para ello, se consideran los valores correspondientes con la mínima temperatura diaria: PMVn, PPDn y h_{ss} y con la máxima temperatura diaria: PMVd, PPDd y $h_{Tmáx}$. Si el valor PMV es mayor o igual que 0, PPD mantiene su valor positivo; mientras que si PMV es negativo, PPD = -PPD. Una vez establecido el signo de los valores PPD, se sitúan los pares de valores (h_{ss} , PPDn), ($h_{Tmáx}$, PPDd) y ($h_{ss} + 24$, PPDn) en el plano cartesiano y se unen mediante segmentos lineales. A continuación, se trazan rectas horizontales en los valores umbral PPD = 51% e PPD = -51%, de forma que el número de horas de insatisfacción es el número de horas al día en el que el recorrido diario de PPD supera estos umbrales: por encima del 51% serían horas de insatisfacción por calor y por debajo del -51% serían horas de insatisfacción por frío.

Para entender mejor el procedimiento, a continuación se presentan ejemplos de resultados obtenidos dentro de las 4 posibles combinaciones de valores PMV diurno y nocturno. Los segmentos de color morado indican el número de Horas de Insatisfacción Esperadas, siendo estas por calor cuando están marcadas sobre el nivel PPD = 51% y por frío cuando lo están sobre el nivel PPD = -51%.

- 1) PMVd > 0
PMVn > 0

En estos casos sólo podrían darse Horas de Insatisfacción Esperadas por calor, con un intervalo posible de 0 (si ninguna parte de la evolución diaria supera el valor umbral PPD) a 24 horas (si toda la evolución diaria supera el valor umbral PPD).

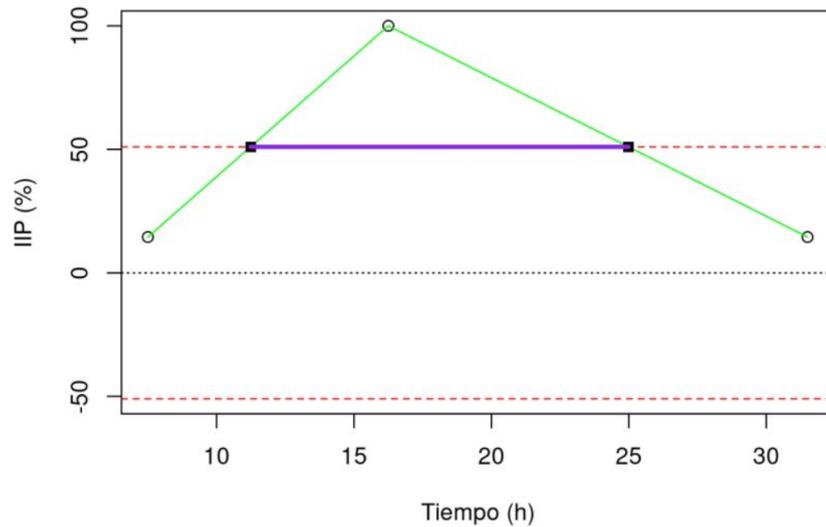


Figura 25. 1. Ejemplo cálculo de número de horas de insatisfacción por calor y/o por frío para el caso $PMV_d > 0$ y $PMV_n > 0$.

- 2) $PMV_d > 0$
 $PMV_n < 0$

En estos casos podrían darse tanto Horas de Insatisfacción Esperadas por calor como por frío, estando su suma comprendida entre 0 y 24 horas, también podría ocurrir que el valor de ambas o alguna de ellas sea 0 si no se superan los respectivos umbrales PPD.

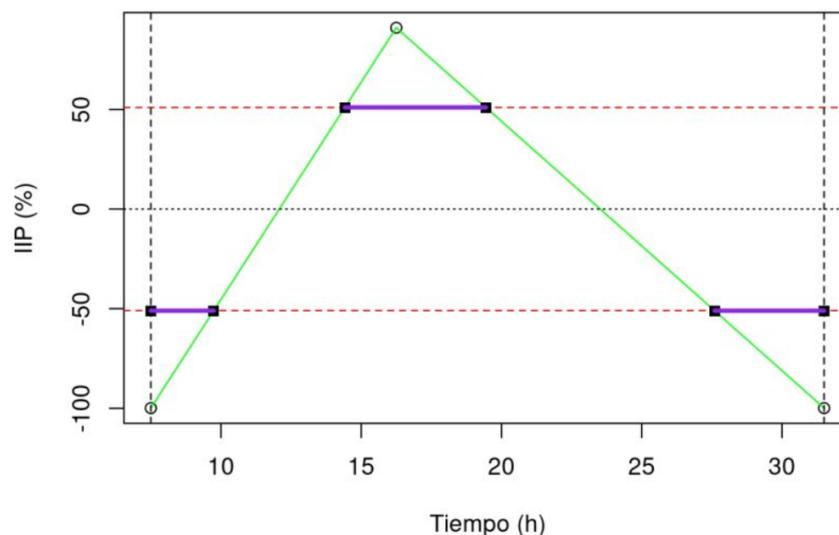


Figura 25. 2. Ejemplo cálculo de número de horas de insatisfacción por calor y/o por frío para el caso $PMV_d > 0$ y $PMV_n < 0$.

- 3) $PMV_d < 0$
 $PMV_n < 0$

En estos casos sólo podrían darse Horas de Insatisfacción Esperadas por frío, con un intervalo posible de 0 (si ninguna parte de la evolución diaria supera el valor umbral PPD) a 24 horas (si toda la evolución diaria supera el valor umbral PPD).

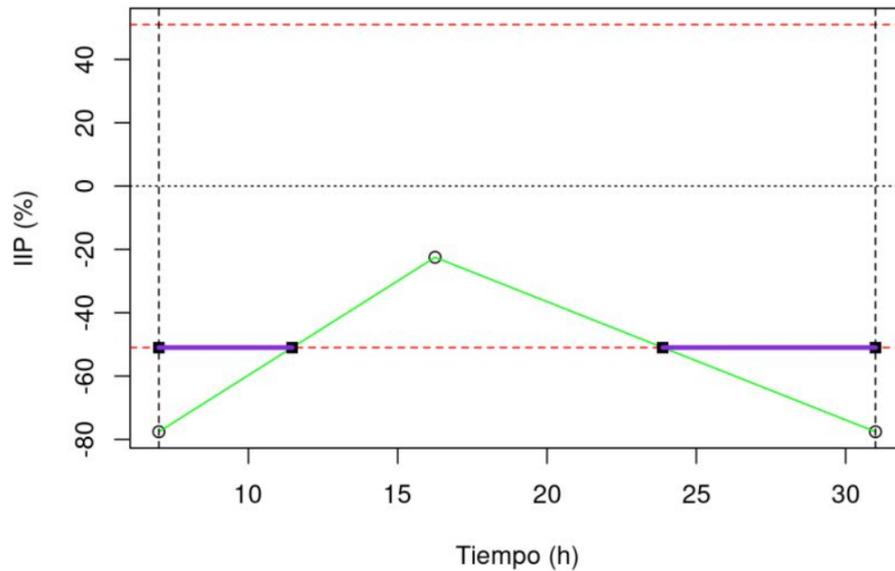


Figura 25.3. Ejemplo cálculo de número de horas de insatisfacción por calor y/o por frío para el caso $PMV_d < 0$ y $PMV_n < 0$.

- 4) $PMV_d < 0$
 $PMV_n > 0$

Estos casos son muy improbables pero posibles si, por ejemplo, las temperaturas mínima y máxima diarias se mantienen muy similares a lo largo del día, puesto que los valores fijados de aislamiento de la ropa varían mucho en determinados meses (Tabla 23. 2), pudiendo ser un aislamiento térmico insuficiente durante el día y excesivo durante la noche. Podrían darse tanto Horas de Insatisfacción Esperadas por calor como por frío, estando su suma comprendida entre 0 y 24 horas, también podría ocurrir que el valor de ambas o alguna de ellas sea 0 si no se superan los respectivos umbrales PPD. No se han dado Horas de Insatisfacción Esperadas por calor ni por frío en ninguno de los casos.

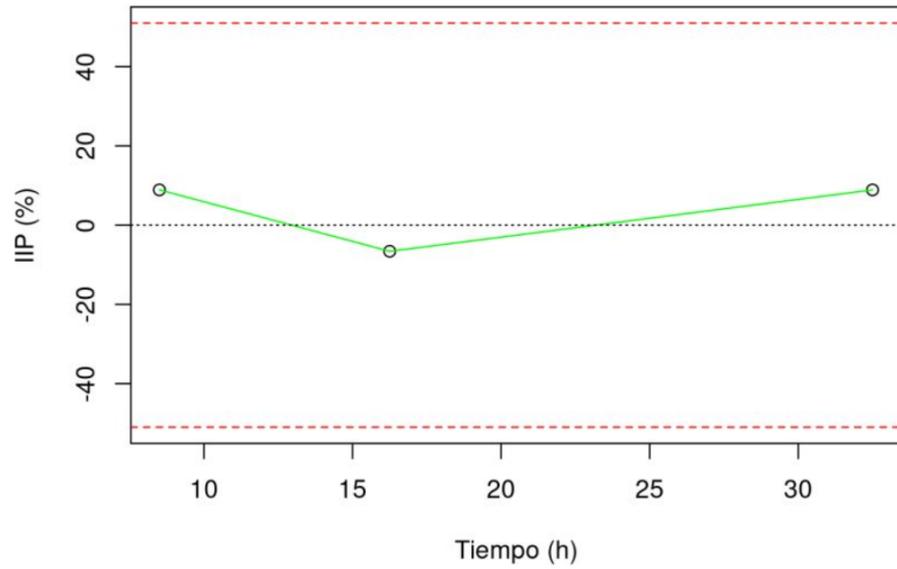


Figura 25. 4. Ejemplo cálculo de número de horas de insatisfacción por calor y/o por frío para el caso $PMV_d < 0$ y $PMV_n > 0$.

Horas de Insatisfacción Esperadas por calor Anual media 1985-2014
ACCESS-CM2 (Historical)



Figura 25. 5. Ejemplo de Horas de Insatisfacción Esperadas por calor Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

Horas de Insatisfacción Esperadas por frío Anual media 1985-2014
ACCESS-CM2 (Historical)

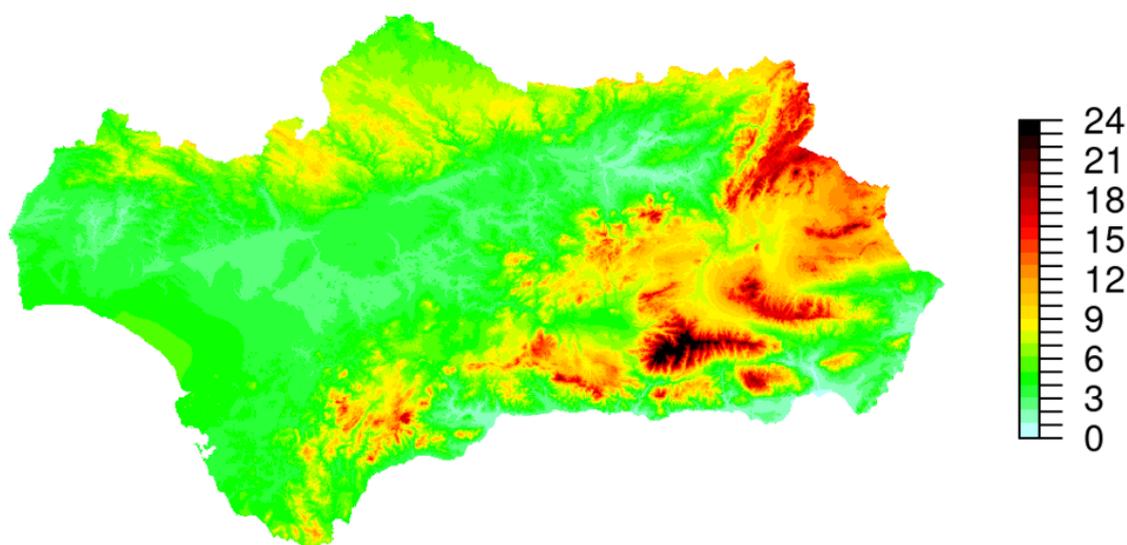


Figura 25. 6. Ejemplo de Horas de Insatisfacción Esperadas por frío Medio Anual del modelo ACCESS-CM2 entre los años 1985-2014.

Como se ha mencionado anteriormente, se debe tener en cuenta los resultados obtenidos en el Voto Medio Esperado y en el Índice de Insatisfacción Esperado para analizar los obtenidos en el número de Horas de Insatisfacción Esperadas, al depender este último índice de los dos primeros. En la media anual histórica para el periodo 1985-2015 se han obtenido valores por debajo de 0 para el Voto Medio Esperado, indicando una sensación térmica casi neutra, algo fría, bastante fría o muy fría y nunca alcanzando sensación de calor. Además, en consecuencia de este resultado, para ese mismo periodo se han obtenido porcentajes de Índice de Insatisfacción Esperado referentes a sensación térmica de frío y no de calor, localizados principalmente en zonas situadas a mayor altitud en las que tanto las temperaturas máximas como mínimas son más bajas. Es por ello que en el índice actual, el número de Horas de Insatisfacción Esperadas -que representa el número de horas al día en las que las personas se encuentran insatisfechas por encima de un porcentaje de insatisfacción del 51% por sensación térmica de calor o frío- refleja los siguientes resultados: el número de horas de insatisfacción por calor muestra valores prácticamente nulos en todo el territorio andaluz, presentando valores ligeramente superiores en parte de la depresión del Guadalquivir, mientras que el número de horas de insatisfacción por frío presenta valores mucho más elevados, concentrados principalmente en las regiones de mayor altitud y alcanzando incluso las 24 horas en los puntos más altos de Sierra Nevada.

El resultado obtenido no corresponde con lo esperado en el caso del número de horas de insatisfacción por calor, pues se esperarían valores más altos y en zonas más amplias, en las que climatológicamente las temperaturas alcanzan los valores máximos, como las provincias

de Córdoba y Sevilla. Los resultados obtenidos en el número de horas de insatisfacción por frío, en cambio, presentan valores más cercanos a lo esperado en cuanto a distribución espacial, aunque estos se encuentran sobrevalorados de forma generalizada. Esto es debido a la dependencia de este índice con respecto de los anteriores y su exageración en la sensación térmica de frío y el porcentaje de personas insatisfechas por sensación de frío.

26. UNIDADES BIOCLIMÁTICAS

Se llevó a cabo la zonificación climática de la región andaluza. Tal como se indicaba en el pliego, para ello se utilizó la técnica clustering, propia de los métodos de clasificación no supervisados. La finalidad de un clustering es encontrar patrones o grupos dentro de un conjunto de observaciones. En las técnicas de clustering es esencial el escalado de los datos para un correcto funcionamiento, debido a la técnica de distancias que es utilizada. Por ello se llevó a cabo el escalado de cada variable en base a su media y desviación estándar. Tras este escalado, se utilizó la técnica de estadística de clustering *kmeans* basada en distancias euclídeas en múltiples dimensiones. Esta técnica se basa en el establecimiento de un número grupos K distintos, entendiéndose como cluster óptimo aquel cuya varianza interna sea lo más pequeña posible. De esta manera, la suma de las varianzas internas de todos los grupos k debe ser lo menor posible.

De acuerdo con los técnicos del REDIAM, las variables utilizadas en el cálculo de las unidades bioclimáticas son aquellas fijadas en anteriores informes realizados al ofrecer resultados satisfactorios. Como indica el pliego, son variables que expresan de una manera directa y universal factores de autoecología vegetal. Este conjunto de variables está conformado por: Temperatura media del mes más cálido, temperatura media del mes más frío, precipitación anual acumulada y potencial fotosintético. También se fijó, de acuerdo con los técnicos, establecer como número K el valor 16. Esto es porque en anteriores experiencias este número de grupos ha aportado información útil e interpretativa.

De esta manera, se llevó a cabo sobre los datos escalados de las variables mencionada la técnica *kmeans* con un máximo de 500 iteraciones y 20 replicaciones de puntos iniciales para evitar la sensibilidad que tiene esta técnica en la aleatoriedad de la fijación de puntos iniciales. Tras el establecimiento de los centroides, se proyectaron a los escenarios climáticos creados, obteniendo las unidades bioclimáticas.

27. MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES (SDM)

Los índices forestales son todos aquellos relacionados con el cálculo de idoneidad climática de las especies forestales en las futuras condiciones ambientales. En cada índice se aportan

tanto el Índice de Potencialidad, resultado de la autoecología paramétrica, como la idoneidad climática, producto de los Modelos de distribución de especies (MDE).

En ambos casos han de utilizarse registros geográficos de las plantas. En este trabajo se han utilizado los registros facilitados por los técnicos de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) y los registros disponibles en el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3 <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>). Finalmente se descartó la incorporación de registros procedentes del GBIF (Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad), debido a que se consideró que la información aportada por estos registros no compensaba el sesgo que tienen ligado.

VARIABLES EDÁFICAS REQUERIDAS POR LA METODOLOGÍA DE AUTOECOLOGÍA PARAMÉTRICA SÓLO SE ENCONTRABAN DISPONIBLES PARA EL TERRITORIO ANDALUZ. Debido a ello esta metodología únicamente fue calibrada a partir de registros de presencia que se encontrasen en territorio andaluz. Por otro lado, los modelos de regresión sólo fueron alimentados a partir de variables predictoras climáticas, haciendo posible la incorporación de registros de presencias externas al territorio andaluz, reduciendo el sesgo que se podría incurrir por la falta de incorporación de presencias por delimitaciones territoriales en la caracterización de la especie. Es por todo esto que para el cálculo de los mapas futuros, las variables climáticas empleadas en los modelos de regresión proceden de una base de datos diferente a la de la autoecología paramétrica.

27.1 SDM SEGÚN AUTOECOLOGÍA PARAMÉTRICA

La metodología de ejecución de la autoecología paramétrica ha sido llevada a cabo tal y como se enuncia en el Anexo II para todas las especies. Las variables ecológicas introducidas han sido las 27 especificadas en el Anexo II, siendo la información edáfica proporcionada por la junta de Andalucía, y la información climática utilizada la que se ha generado en este proyecto. Para cada especie, se calculó en cada variable ecológica aquellos valores que determinaban los intervalos marginales, extramarginales y óptimos según la distribución. Tras ello, para cada píxel del territorio fue calculado el índice de aptitud para cada variable según su posición en el rango de valores de la variable. Para un valor del parámetro x_i el índice de aptitud p_i toma los siguientes valores:

- Para el intervalo (U_{Li} , U_{Si}): $p_i = 1 - (|M_i - x_i| / (U_{Si} - U_{Li}))$.
- Para el intervalo (L_{Li} , U_{Li}): $p_i = (U_{Si} - M_i)(x_i - L_{Li}) / ((U_{Si} - U_{Li})(U_{Li} - L_{Li}))$.
- Para el intervalo (U_{Si} , L_{Si}): $p_i = (M_i - U_{Li})(L_{Si} - x_i) / ((U_{Si} - U_{Li})(L_{Si} - U_{Si}))$.
- Para cualquier valor fuera de (L_{Li} , L_{Si}): $p_i = NA$.

Una vez calculados todos los índices de aptitud, definimos el Índice de potencialidad con la siguiente fórmula:

$$Ipot = 4 + \frac{1}{NP} * \log (p1 * p2, \dots pNP)$$

Con respecto a los registros de las plantas, en esta metodología se requiere únicamente registros de presencias . Para cada especie, los registros de presencias en territorio andaluz provenientes del REDIAM y del IFN3 fueron solapados, imponiéndose que la distancia de los primeros a los segundos debía ser de 400 metros. A continuación, en el registro de presencias resultante se aplicó un filtrado de malla de 400 x 400 metros, con el fin de reducir los sesgos derivados de los inventarios. Estas dimensiones fueron seleccionadas bajo consejo y acuerdo con los técnicos de la Red de Información Ambiental de Andalucía, debido a que es requerido a su vez un número elevado de registros para el funcionamiento óptimo. Por último cabe mencionar que para ciertas especies no se dispuso de información en alguna de las dos fuentes de información.

Especie	Fuente de datos utilizada
<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	IFN3
<i>Pistacia lentiscus</i> L.	REDIAM
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	REDIAM
<i>Viburnum tinus</i> L.	REDIAM

Tabla 27.1.1. Tabla de plantas en las cuales no se ha incorporado las dos fuentes de información (IFN3 y REDIAM) en la metodología paramétrica.

Las variables predictoras utilizadas fueron aquellas enumeradas en el pliego, a excepción de ciertas variables que fueron consideradas en exceso restrictivas. Por tanto, las variables seleccionadas, mediante consensos con los técnicos de la Red de Información Ambiental de Andalucía, fueron:

Variables utilizadas	
Pendiente	Incidencia solar anual
Precipitación total	Temperatura media anual
Eto total	Suma de superavits
Índice hídrico anual	Temperatura media de las máximas del mes más cálido
Temperatura media de las mínimas del mes más frío	Oscilación térmica total
Balance hídrico	Potencial fotosintético
Arena	Arcilla
Capacidad de retención de agua	Caliza activa
pH	Capacidad de intercambio catiónico

Tabla 27.1.2. Tabla de variables predictoras utilizadas en Autoecología paramétrica

Por último, en cada índice de los siguientes se muestra dos ejemplos de proyecciones, uno a pasado en el período 1985-2014, y otro a futuro en el período 2071-2100, siendo los modelos climáticos elegidos aleatoriamente.

27.2 N° DE VARIABLES ÓPTIMAS

Con el mismo dataset de presencias, variables, y umbrales generados en 27.1 se lleva a cabo el cálculo de la variable N° de variables óptimas.

En cada especie, se calculó en cada variable ecológica para cada píxel del territorio según su posición en el rango de valores de la variable:

- Para el intervalo (U_{li} , U_{si}): 1
- Para el intervalo (L_{li} , L_{si}): 0
- Para cualquier valor fuera de (L_{li} , L_{si}): NA.

Una vez calculados esto, en cada especie se lleva a cabo el sumatorio de las nuevas capas generadas, obteniendo el número de variables óptimas para la especie.

27.3 SDM SEGÚN GAM REGULARIZADO

Los modelos de regresión son modelos matemáticos usados para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente, m variables independientes y un término aleatorio ε .

El algoritmo finalmente utilizado para este trabajo es GAM (Generalize Additive Model), creado por Trevor Hastie y Rober Tibshirani. Este algoritmo se basa en que la relación entre una variable predictora y la variable dependiente sigue unos patrones curvilíneos que pueden ser lineales o no lineales, y que se puede obtener finalmente la variable dependiente como el sumatorio simultáneo de todas las relaciones curvilíneas mencionadas. Los principales aspectos positivos de GAM son su fácil interpretación, sus flexibles funciones que son capaces de mostrar patrones escondidos en los datos, y la posibilidad de regularización ayudando a evitar un fenómeno como el sobreajuste. Maialen Iturbide (2018) defiende que en aquellos modelos de distribución de especies cuyo fin sea la obtención de proyecciones en condiciones climáticas futuras, el uso de modelos parsimoniosos aporta mejores resultados. Por todas estas razones, y tal y como recomienda Gastón A. & García-Viñas J.I.(2011), en este proyecto fueron finalmente utilizados modelos GAM regularizados que eviten el sobreajuste. En este proyecto los algoritmos serán calibrados suavizados con un parámetro $k=4$ con forma p-splines en cada variable predictora, tal y como llevan a cabo Gastón A. & García-Viñas J.I.(2011).

A diferencia de la autoecología paramétrica, estos algoritmos matemáticos requieren de registros de presencia y ausencias o pseudo-ausencias. El IFN3 aporta una gran información al proporcionar tanto presencias como ausencias para cada especie debido a la tipología de muestreo en rejilla de 1 km². Para cada especie, los registros de presencias provenientes del REDIAM y del IFN3 fueron solapados, imponiéndose que la distancia de los primeros a los segundos debía ser de 1 km, y después se aplicó un filtrado de malla de 1000 x 1000 metros, con el fin de reducir los sesgos derivados de los inventarios. A continuación, se eliminaron aquellos registros de ausencias del IFN3 que estuviesen a 3 kilómetros o menos distancia a cualquier presencia. Por último, se eliminaron las ausencias que tuviesen una similitud climática a las presencias, a través de una envuelta superficial ambiental (fijando un quant del 5%). De esta manera, se eliminan aquellas ausencias que a priori son provocadas por factores diferentes a los climáticos.

Al usar únicamente variables climáticas, era posible incorporar registros de presencias que se encontrasen fuera del territorio andaluz. Es decir, se pudo incorporar información del rango ambiental de la especie sin la influencia de límites territoriales. Por esta razón, las presencias y ausencias que se utilizaron en cada especie son aquellas que se encontraban dentro del territorio de las regiones de procedencia de cada especie existentes sobre territorio andaluz.

Una vez procesados los registros de presencia y ausencia, para la ejecución de los modelos de regresión se sigue el clásico flujo de trabajo en los procesos de modelización, el cual consiste en replicar varias veces una partición en dos de los datos para que una se destine al entrenamiento del modelo y la otra para la evaluación de este. De esta manera se comprueba el rendimiento de estos a través de distintos estadísticos evaluatorios obtenidos con los datos training y test (sensibilidad, especificidad, AUC), pudiendo comprobar el sesgo y la varianza de las predicciones. El punto de corte del MDE final, se establece en aquella idoneidad de presencia que maximiza la sensibilidad y la especificidad.

En esta metodología también hubo especies para las que no se dispuso de información en alguna de las dos fuentes de información de registros. Para *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis* y *Viburnum tinus* no existían registros en el IFN3, por lo que tampoco se disponía de registros de ausencias. Para estas plantas se usó en la calibración del modelo registros de pseudoausencias manteniendo una prevalencia 1, generadas en al azar en aquellos espacios que cumplieren las condiciones de distancia espacial (3 kilómetros) y ambiental (envuelta superficial ambiental), además de encontrarse en terreno forestal

Por último, en la selección de variables para cada planta se tuvo en cuenta la significancia estadística a través del test de Wald en un GLM, el sentido ecológico de las variables predictoras mediante la revisión de varias publicaciones relevantes (Ruiz de la Torre, J., 2006; Castroviejo, S. (coord. gen.). 1986-2012; Alía Miranda, R.,2009), y la incertidumbre y el sentido ecológico de la respuesta de la variable independiente frente a cada variable predictora en un modelo GAM (a través del estudio de la forma y el intervalo de confianza de las curvas de respuesta). Durante la selección fue estudiada los cambios del R2. El conjunto final de variables predictoras, con objetivo de no albergar multicolinealidad entre variables, no muestran entre ellas una correlación lineal mayor de 0.8 y el VIF tiene un valor inferior a 5.

	Fuente de datos utilizada	Ausencia/Pseudoausencia
<i>Crataegus monogyna</i>	IFN3	Ausencia
<i>Pistacia lentiscus</i>	REDIAM	Pseudoausencia
<i>Rosmarinus officinalis</i>	REDIAM	Pseudoausencia
<i>Viburnum tinus</i>	REDIAM	Pseudoausencia

Tabla 27.1.2. Tabla de plantas en las cuales no se ha incorporado las dos fuentes de información (IFN3 y REDIAM) en los modelos de regresión.

En cada modelo se calcula el sesgo asociado al modelo (AUC, sensibilidad y especificidad), la varianza a través del contraste entre los resultados training y test del AUC.

28. TEMPERATURA MEDIA

Esta variable se ha calculado como la temperatura media entre las máximas y mínimas a escala anual. Al igual que en el resto de cálculos de temperatura, se ha calculado el valor para cada observatorio y, a continuación, se ha interpolado utilizando la altitud como covariable.

29. N° DE MESES CON BH > 0

De forma muy simple, y partiendo de los valores ya previos obtenidos de BH sobre cada punto de malla de 200x200m para todos los meses del año, se ha procedido al conteo en cada punto del total de aquellos meses con un BH>0 a lo largo del año.

Se muestran a modo de ejemplo (figura 29.1) los resultados obtenidos para el periodo historical 1985-2014.

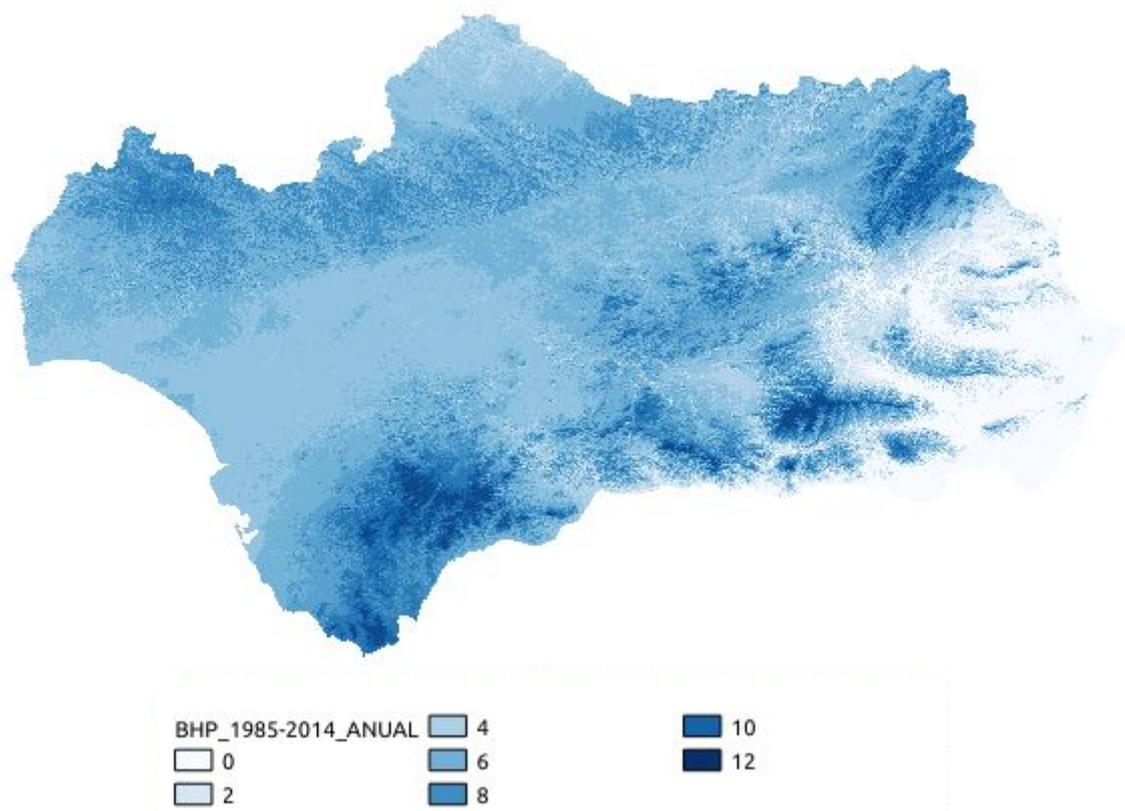


Figura 29.1 N° de meses con Balance Hídrico mayor que 0 para el periodo 1985-2014.

30. ÍNDICE DE ARIDEZ

El índice de aridez (IA) es uno de los muchos índices que se emplean para caracterizar la aridez de una localización, relacionando directamente la precipitación y la evapotranspiración de referencia en un punto mediante la expresión:

$$IA = \frac{Pr}{ET_0} \quad [\text{Ecuación 30.1}]$$

Esta fórmula se ha aplicado directamente en cada punto de rejilla tratado en Andalucía introduciendo la precipitación acumulada en el intervalo temporal en cuestión y la ETo

correspondiente. Es un índice adimensional, cobrando valores $0 < IA < 1$ en función de cuán árido es un punto, y $IA > 1$ si por el contrario el punto presenta un carácter “húmedo”.

31. SUPERÁVIT HÍDRICO

Desde el punto de vista del régimen hídrico es importante caracterizar para cada punto no sólo el Balance Hídrico, sino también a lo largo del año las relaciones entre el exceso o déficit de precipitación y sus acumulaciones, ya que estos valores también denotan la naturaleza de la aridez de un territorio según la época del año. Estos valores se definen con los índices de suma de superávits (SUP) y la suma de déficits (DEF) de agua, y suelen ser usados para la definición de bioclimas o el estudio de la distribución potencial de especies vegetales.

En el caso de SUP, obtenemos el valor de este índice mediante la siguiente expresión:

$$SUP = \sum_{m=1}^{12} (Pr_m - ETo_m) \Leftrightarrow (Pr_m - ETo_m) > 0 \text{ [Ecuación 31.1]}$$

Es decir, SUP es la suma a lo largo del año de la diferencia, para cada mes, de la precipitación mensual y su equivalente de evapotranspiración de referencia, si y sólo si esa diferencia es positiva (superávit). Sus unidades son los “mm”, y se calcula a la par de la obtención del BH sobre cada punto de rejilla de Andalucía.

32. DÉFICIT HÍDRICO

De forma opuesta al previo SUP, DEF se define como la suma de déficits mediante la siguiente expresión:

$$DEF = \sum_{m=1}^{12} (Pr_m - ETo_m) \Leftrightarrow (Pr_m - ETo_m) < 0 \text{ [Ecuación 32.1]}$$

Es decir, DEF es la suma a lo largo del año de la diferencia, para cada mes, de la precipitación mensual y su equivalente de evapotranspiración de referencia, si y sólo si esa diferencia es negativa (déficit); sus unidades son los “mm”.

La figura 32.1 muestra un ejemplo de Déficit Hídrico anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

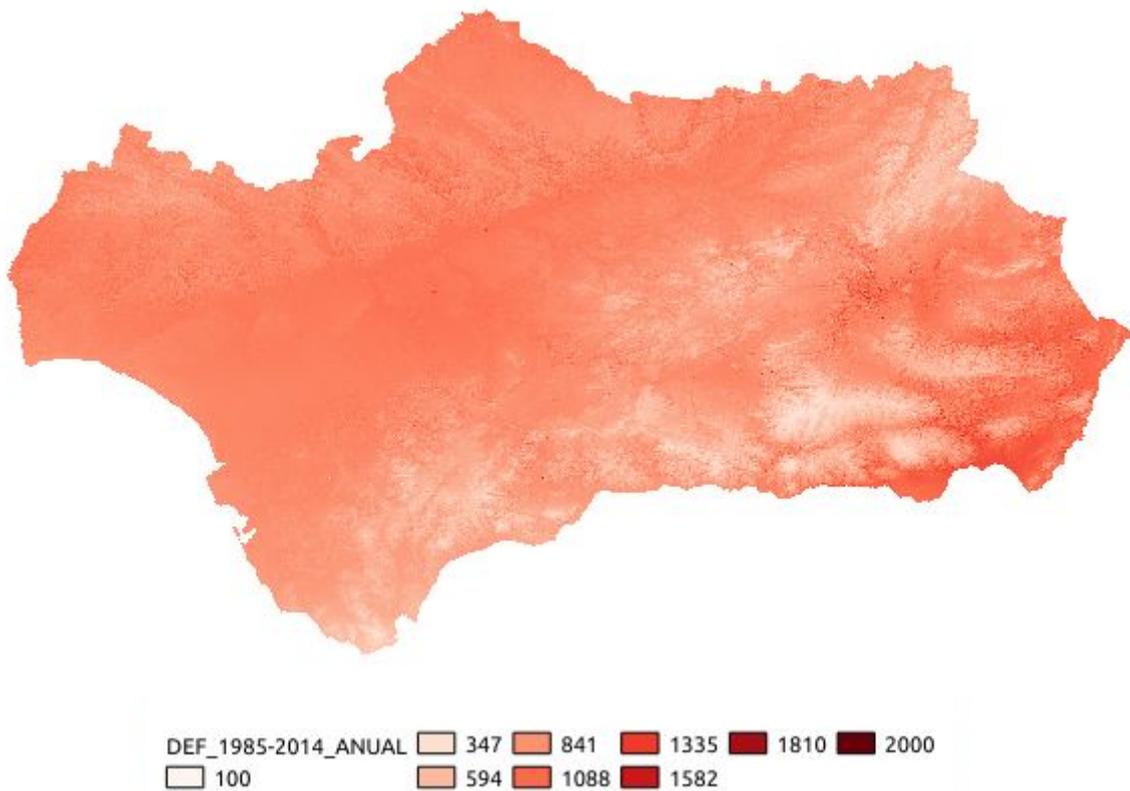


Figura 32.1 Déficit Hídrico anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

33. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

Como otro indicador derivado del BH, la ETr permite obtener un valor estimado al real de la pérdida de humedad del suelo por evapotranspiración. A diferencia de la ETo que indica la pérdida potencial en presencia permanente de agua, la ETr indica aquella evapotranspiración que la humedad presente en el suelo permite realmente.

Su valor se consigue por la condición:

$$Si ETo_m > (BH_{m-1} + Pr_m) \Rightarrow ETr_m = BH_{m-1} + Pr_m$$

[Ecuación 33.1]

$$Si ETo_m < (BH_{m-1} + Pr_m) \Rightarrow ETr_m = ETo_m$$

Es decir, si la ETo total excede la suma de la humedad ya disponible y de aquella que aporta la precipitación ese mes, el máximo que podrá evapotranspirarse será la suma de ambos valores de agua. Si la ETo es menor a dicha suma, ante la presencia suficiente de humedad será ese valor el evapotranspirado, dejando un remanente de agua en el suelo.

La figura 33.1 muestra, como ejemplo, un mapa de Andalucía con la evapotranspiración real anual calculada para el periodo 1985 - 2014.

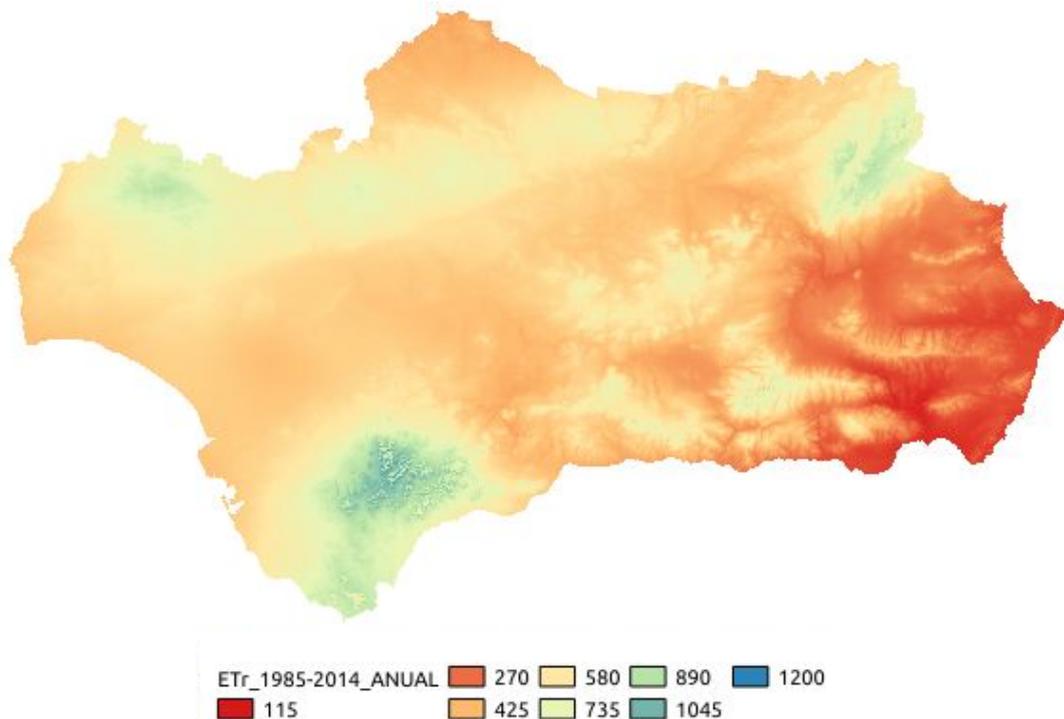


Figura 33.1 Evapotranspiración real anual calculada para el periodo 1985 - 2014.

34. DURACIÓN DE LA SEQUÍA

De forma muy simple, y partiendo de los valores ya previos obtenidos de BH sobre cada punto de la malla de 200x200m para todos los meses del año, se ha procedido al conteo en cada punto del total de aquellos meses con un BH=0 a lo largo del año.

La figura 34.1 muestra, como ejemplo, un mapa de Andalucía con la Duración anual de la sequía en meses calculada para el periodo 1985 - 2014.

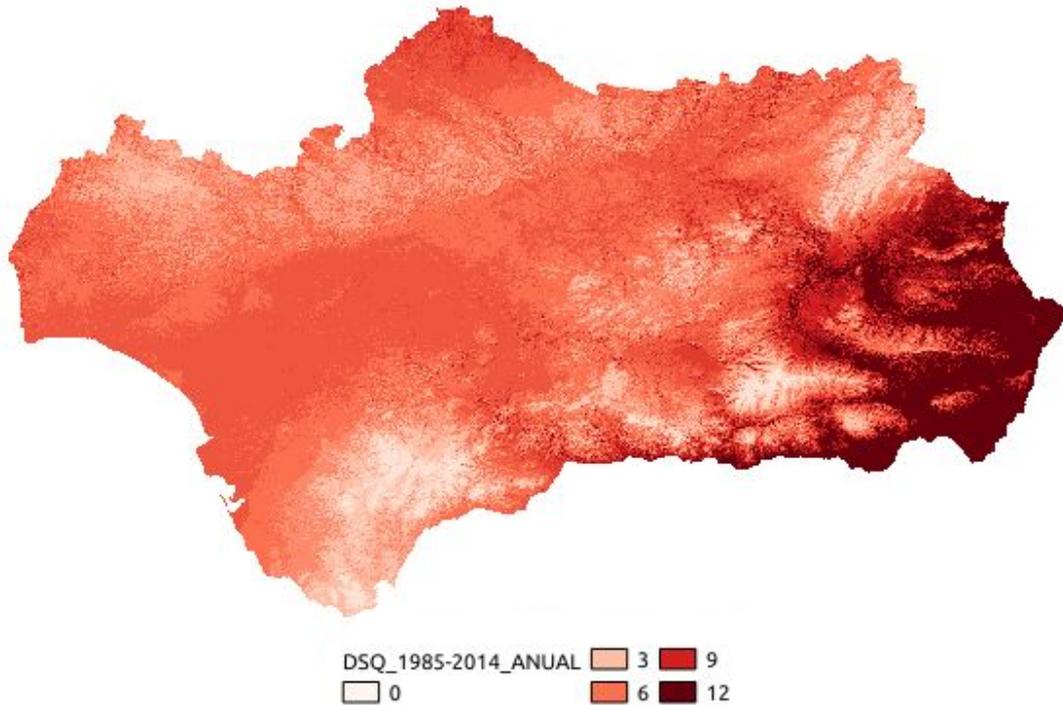


Figura 34.1 Duración de la sequía anual en meses calculada para el periodo 1985 - 2014.

35. INTENSIDAD DE LA SEQUÍA

Como un indicador complementario a los ya descritos anteriormente para la caracterización de la aridez en un punto, el índice ISQ expresa la magnitud de la sequía en una localización, siendo expresada matemáticamente mediante:

$$ISQ = \sum_{m=1}^{12} (Pr_m - \bar{T}_m) \Leftrightarrow ISQ < 0 \quad [\text{Ecuación 35.1}]$$

es decir, ISQ es el sumatorio de los valores de cada mes resultante, siempre que sean negativos, de la diferencia entre la precipitación mensual y la temperatura media del mes, quedando expresado en (mm-°C)*mes.

La figura 35.1 muestra un mapa de Andalucía con la Intensidad anual de la sequía calculada para el periodo 1985 - 2014.

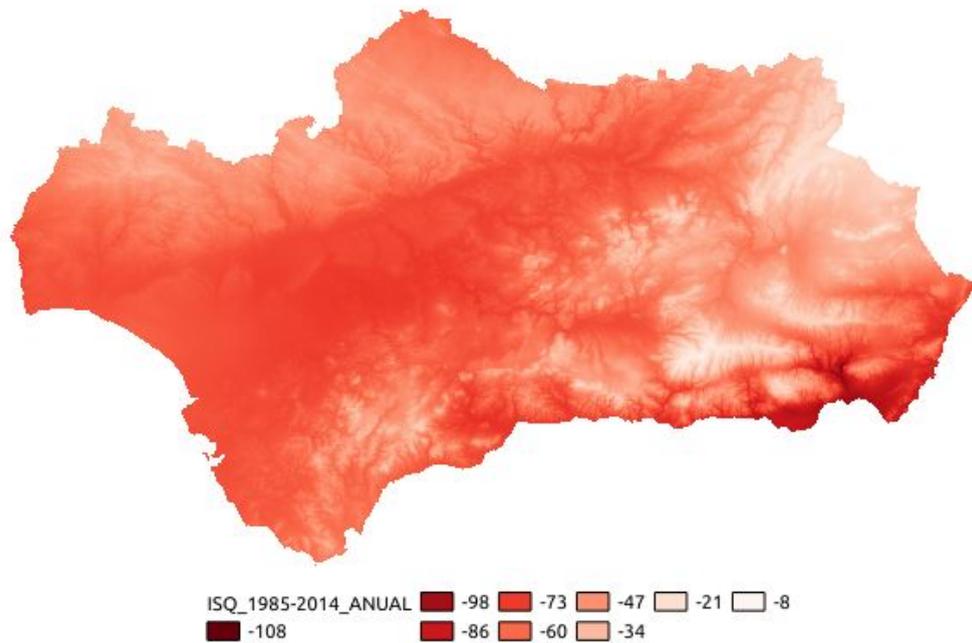


Figura 35.1 Intensidad anual de la sequía calculada para el periodo 1985 - 2014.

36. ÍNDICE HÍDRICO ANUAL

Otro de los muchos indicadores que permiten determinar el carácter árido o húmedo de un territorio es el IHD, que relaciona el valor de los superávits y déficits hídricos acumulados a lo largo del año con la ETo total anual. Su expresión resultaría así:

$$IHD = \frac{100 \cdot SUP - 60 \cdot DEF}{ET_o} \quad [\text{Ecuación 36.1}]$$

En este caso estaríamos antes un indicador adimensional de valor anual. Sus valores oscilarían entre negativo y positivo en función del carácter árido o húmedo del punto.

La figura 36.1 muestra, como ejemplo, un mapa de Andalucía con el Índice Hídrico anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

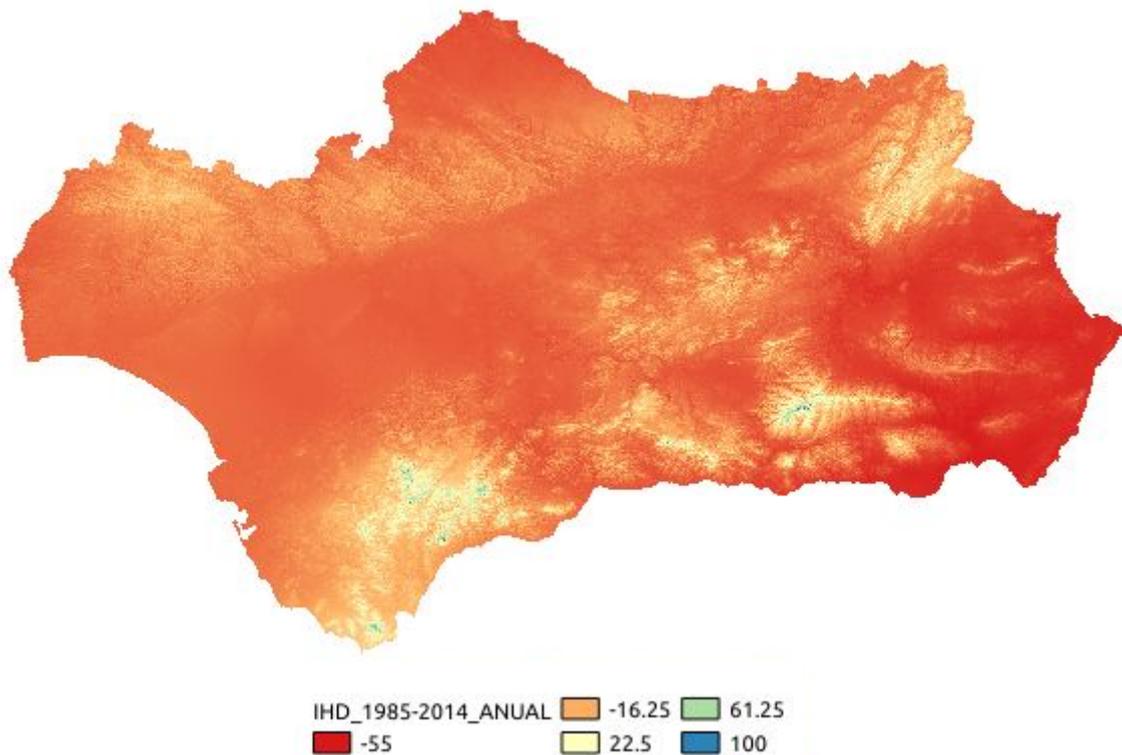


Figura 36.1 Índice hídrico anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

37. ÍNDICE DE HUMEDAD ANUAL

De forma equivalente al IHD, el IHM también caracteriza la aridez o humedad de un territorio a lo largo del año, en este caso relacionando directamente la precipitación anual en un punto y la ETo total en el año.

Se obtendría mediante la expresión siguiente:

$$IHM = 100 \cdot \frac{Pr - ETo}{ETo} \quad [\text{Ecuación 37.1}]$$

También es un índice adimensional, cambiando de negativo a positivo según el carácter árido o húmedo del territorio.

La figura 37.1 muestra, como ejemplo, un mapa de Andalucía con el Índice de Humedad anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

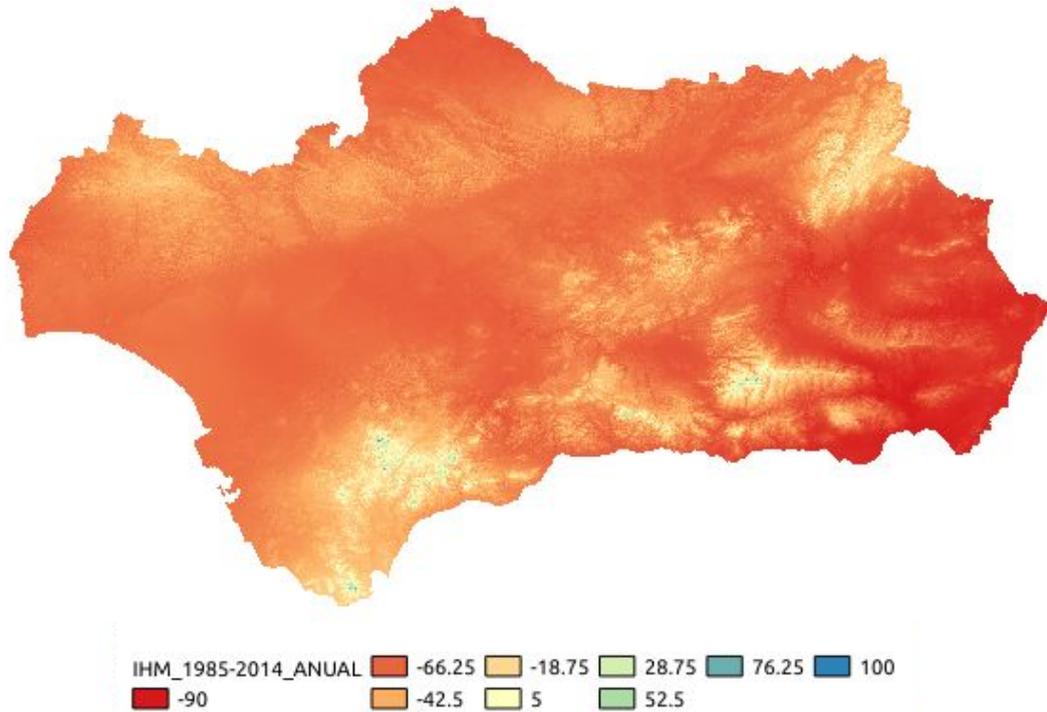


Figura 37.1 Índice de humedad anual calculado para el periodo 1985 - 2014.

38. OSCILACIÓN TÉRMICA

La Oscilación Térmica es un indicador muy utilizado en la meteorología para caracterizar la continentalidad del clima de una región y lo extremo de su carácter térmico. Esta variable es la diferencia entre las Temperaturas Media del mes más Cálido (TMC) y Temperatura Media del mes más Frio (TMF). Se ha calculado mediante los raster de las propias variables. Se mide en °C y nos da una impresión de lo atemperado/contenido del carácter térmico de una zona (aquellas con temperaturas más constantes durante el año) o de lo variable de otra, con las estaciones marcadas y grandes diferencias entre verano/invierno.

La figura 38.1 muestra un mapa de Andalucía con la Oscilación Térmica media calculada para el periodo histórico 1985 - 2014 del modelo climático ACCESS-CM2.

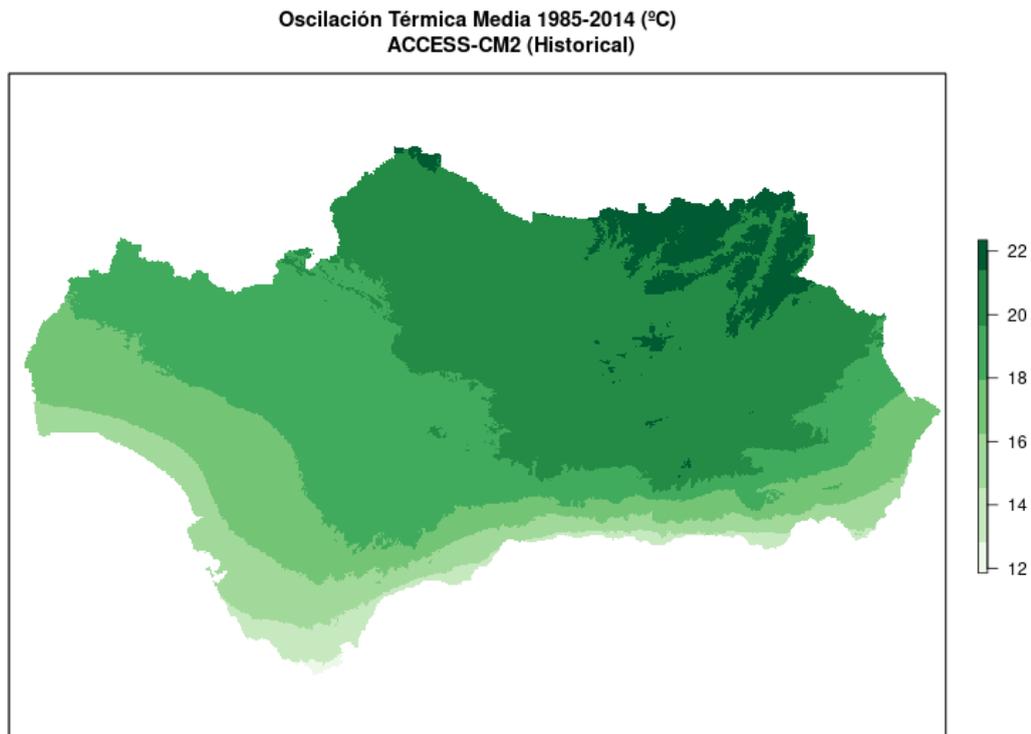


Figura 38.1 Oscilación térmica media calculada para el periodo histórico 1985 - 2014 del modelo climático ACCESS-CM2.

39. OSCILACIÓN TÉRMICA TOTAL

La Oscilación Térmica Total es una variación de la previa en la que en su cálculo se consideran otros parámetros, a saber: media de las temperaturas mínimas del mes más cálido (TMMC), y media de las temperaturas máximas del mes más frío (TMMF), y se ha calculado mediante los raster de las propias variables. Al no tratar ahora sólo con la media global del mes, sino con la parte más fría del mes frío y la cálida del cálido, podemos tener en cuenta aspectos como zonas con fuertes inversiones térmicas en invierno (y mínimas muy bajas) que se desdibujaban al computar la máxima diaria, o verdaderas sartenes de calor en verano en zonas rurales donde refresca por la noche. Esto nos permite conocer la oscilación térmica total del año en cada punto, lo que es un valor muy útil para la continentalidad de un área.

40. FACTOR DE DISPONIBILIDAD FOTOSINTÉTICA

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 para el Potencial Fotosintético (PF), la fotosíntesis en la hoja de una planta es factible cuando tenemos luz solar, la temperatura se encuentra entre

los 7.5°C y los 35°C y no existe estrés hídrico (relación positiva entre ETr y ETo). En el mejor de los casos, en un día ideal con reservas de humedad, el factor DF equivaldría al total de horas de luz diarias (fotoperiodo); sin embargo, si la Tmin o la Tmax exceden alguno de esos umbrales previos (aproximando que tienen lugar justo al alba y ocaso respectivamente), habría una franja de luz disponible donde no tendría lugar actividad fotosintética, y el factor DF tendría un valor inferior.

En un día particular el factor DF puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (T_{max} > U_x) & \rightarrow PF = \frac{U_x - U_m}{T_{max} - T_{min}} \cdot \Delta \\
 \text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (U_m < T_{max} < U_x) & \rightarrow PF = \frac{T_{max} - U_m}{T_{max} - T_{min}} \cdot \Delta \\
 \text{si } (U_m < T_{min} < U_x) \text{ y } (T_{max} > U_x) & \rightarrow PF = \frac{U_x - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \cdot \Delta \\
 \text{si } (U_m < T_{min} < U_x) \text{ y } (U_m < T_{max} < U_x) & \rightarrow PF = \Delta \\
 \text{si } (T_{min} < U_m) \text{ y } (T_{max} < U_m), \text{ ó, } (T_{min} > U_x) \text{ y } (T_{max} > U_x) & \rightarrow PF = 0
 \end{aligned}$$

[Ecuación 40.1]

siendo:

Tmin = la temperatura mínima media del mes (°C), Tmax = la temperatura máxima media del mes (°C), Um = umbral mínimo de cálculo (7.5 °C), Ux = umbral máximo de cálculo (35 °C),

con Δ siendo el factor corrector para la PF que relaciona la ETr y la ETo de la siguiente manera:

$$\Delta = \frac{ETr}{ETo} \cdot N_{dias} \cdot fp [x]$$

El factor DF es un valor potencial de productividad que no considera limitantes edáficos y climáticos de otro tipo que no sean la temperatura, precipitación y evapotranspiración. Está expresado en horas, y su máximo no puede ser mayor de 4.380 h al año.

Se muestra a continuación (figura 40.1) un ejemplo de los valores obtenidos de DF a escala anual para el periodo histórico 1985-2014 del modelo climático MPI-ESM2-MR para así poder observar la distribución de los valores obtenidos sobre Andalucía.

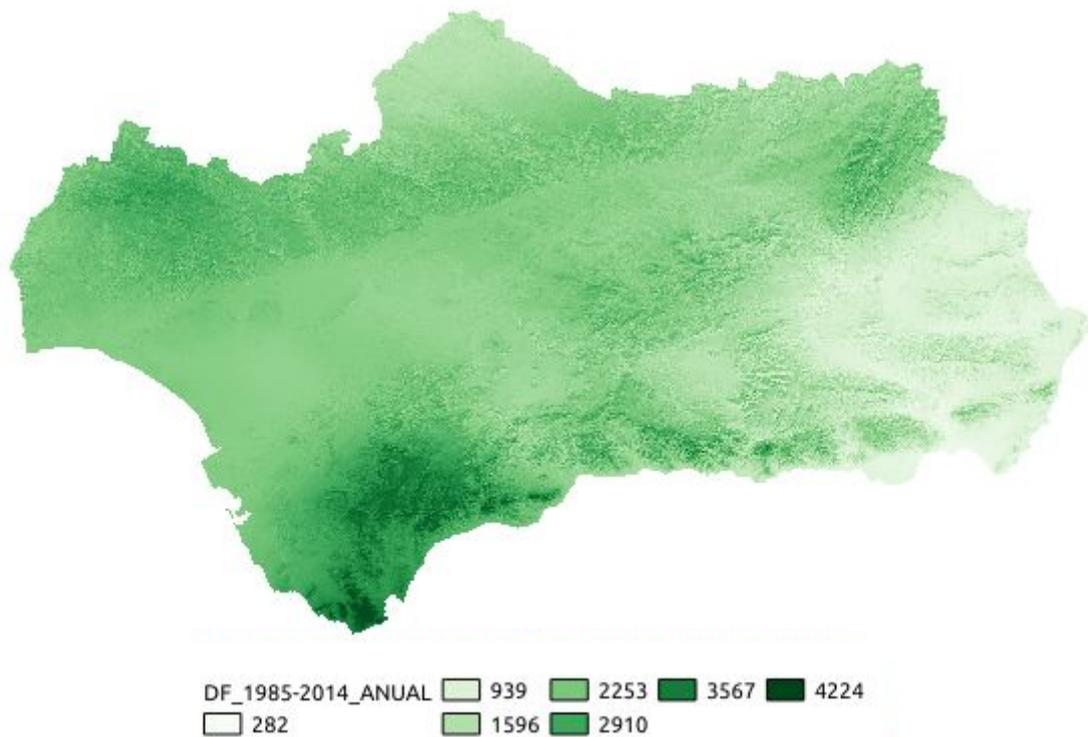


Figura 40.1 Factor de Disponibilidad Fotosintética (DF) anual calculada para el periodo histórico 1985 - 2014 del modelo climático MPI-ESM2-MR.

41. ÍNDICES DE SEQUÍA: SPI

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, Standard Precipitation Index) (McKee et al.1993) se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del período de acumulación de que se trate, respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal. De este modo se define una escala de valores que se agrupa en tramos relacionados con el carácter de la precipitación. Tiene como ventaja que permite trabajar a escalas temporales identificando diferentes tipos de sequías y sus respuestas a diferentes sistemas naturales. Se basa en dos asunciones: 1) que la variabilidad de la precipitación es mayor que la de la temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP); y 2) que el resto de variables son estacionarias en el tiempo.

Es uno de los índices más usados en las últimas décadas ya que cuenta con una base sólida, robusta y versátil. Puede calcularse a diferentes escalas, de manera que el SPI a 1 mes representa las condiciones a corto plazo como el estrés hídrico de un cereal; a 3 meses representará el medio y corto plazo y un ejemplo sería la precipitación estacional; a 6 meses representa el medio plazo y como ejemplo sería el déficit potencial de precipitación; a 9 meses supone la caracterización de los patrones de precipitación, valores inferiores a 1.5 en

este caso podrían suponer impactos sustanciales en la agricultura; y a 12 meses representa los patrones a largo plazo de precipitación con impacto en reservas de agua.

SPI	Umbrales
Extremadamente húmedo	≥ 2
Severamente húmedo	1.5 a 2
Moderadamente húmedo	0.5 a 1.5
Normal	-0.5 a 0.5
Moderadamente seco	$-1.5 \leq -0.5$
Severamente seco	$-1.5 \leq -2$
Extremadamente seco	≤ -2

Tabla 41.1. Escala del índice SPI

REFERENCIAS

McKee, T.B.N., J. Doesken, and J. Kleist, (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conf. On Applied Climatology. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. 179-184.

42. ÍNDICES DE SEQUÍA: SPEI

El Índice de Evapotranspiración y Precipitación Estandarizado (SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration) (Vicente-Serrano et al, 2010) supone una variante del SPI. Presenta un mayor potencial ya que es sensible al impacto del cambio climático al considerar el balance hídrico como la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial.

SPEI	Umbrales
Extremadamente húmedo	≥ 2
Severamente húmedo	1.5 a 2
Moderadamente húmedo	0.5 a 1.5
Normal	-0.5 a 0.5
Moderadamente seco	$-1.5 \leq -0.5$
Severamente seco	$-1.5 \leq -2$
Extremadamente seco	≤ -2

Tabla 42.1. Escala del índice SPEI

REFERENCIAS

Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010) A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.

43. ÍNDICES DE ARIDEZ

Mientras que la sequía es una anomalía natural transitoria (aunque suficientemente prolongada), la aridez es una situación estructural natural de una región y por tanto “permanente”, aunque puede cambiar en periodos muy largos. Por ello es interesante determinar si la región va a volverse más árida o húmeda, independientemente de los cambios que puedan producirse respecto a los periodos de escasez hídrica (sequía).

43.1 ÍNDICE DE ARIDEZ DE LANG

El índice de Lang se define como el cociente entre la lluvia anual y la temperatura media anual.

$$I_L = \frac{P}{T}$$

donde: P = Precipitación media anual (mm) y T = Temperatura media anual (°C)

La tabla 43.1 recoge los tipos de clima que define este índice:

Tipo	Umbrales
Estepario	<40
Semiárido	40 a <60
Templado cálido	60 a <100
Templado húmedo	100 a <160
Húmedo	>160

Tabla 43.1. Climas clasificados por Lang

43.2 ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONNE

El índice de aridez de Martonne viene expresado por la siguiente fórmula:

$$I_a = \frac{P}{T+10}$$

Siendo: P = Precipitación media anual (mm) y T = Temperatura media anual (°C)

Según este índice de aridez de Martonne, el valor de 20 es la frontera entre las zonas húmedas y las semiáridas, y valores de 15 e inferiores corresponden a las regiones áridas.

Con este índice las regiones climáticas se clasifican según se muestra en la tabla 43.2.

Tipo	Umbrales
Árido extremo (desierto)	<5
Árido (estepario)	5 a <15
Semiárido (mediterráneo)	15 a <20
Sub-húmedo	20 a <30
Húmedo	30 a <60
Perhúmedo	60 o >60

Tabla 43.2. Climas clasificados por Martonne.

44. OLAS DE FRÍO

Los episodios de olas de frío (es decir, un periodo de días consecutivos con temperaturas mínimas extremas) se han calculado atendiendo a las definiciones propuestas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, en su documento *Olas_Calor_Actualizacion_Junio_2019.pdf*), por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, World Meteorological Organization, en WMO, 2010) y por el IPCC, a partir de las cuales se han establecido los criterios para calcular y evaluar una ola de calor (Gaitán et al. 2019).

De manera que se considera una ola de frío cuando al menos durante tres días consecutivos la temperatura mínima diaria es inferior al percentil 5 de la serie diaria de temperatura mínima correspondiente a los meses de noviembre a abril para un periodo de referencia histórico.

El episodio de ola de frío se analiza en base a su duración, intensidad media e intensidad máxima alcanzada durante dicho episodio.

44.1 DURACIÓN

La duración de una episodio de ola de frío se define como el número de días consecutivos en los que se cumple que la temperatura mínima es inferior al umbral establecido.

44.1 INTENSIDAD MEDIA

La intensidad media de un episodio de ola de frío es el promedio de los valores de temperatura mínima registrados en los días que constituyen el episodio de ola de frío.

44.1 INTENSIDAD MÁXIMA

La intensidad máxima de un episodio de ola de frío es el valor más extremo de los valores de temperatura mínima registrados en los días que constituyen el episodio de ola de frío.

REFERENCIAS

Gaitan, E., Monjo, R., Portoles, J., Pino-Otin, M.R., 2019. Projection of temperatures and heat and cold waves for Aragon (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs. *Sci. Total Environ.* 650, 2778–2795

45. OLAS DE CALOR

Los episodios de olas de calor (es decir, un periodo de días consecutivos con temperaturas máximas extremas) se han calculado atendiendo a las definiciones propuestas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, en su documento

Olas_Calor_Actualizacion_Junio_2019.pdf), por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, World Meteorological Organization, en WMO, 2010) y por el IPCC, a partir de las cuales se han establecido los criterios para calcular y evaluar una ola de calor (Gaitán et al. 2019).

De manera que se considera una ola de calor (episodio de ola de calor) cuando al menos durante tres días consecutivos la temperatura máxima diaria es superior al percentil 95 de la serie diaria de temperatura máxima correspondiente a los meses de junio a septiembre para un periodo de referencia histórico.

El episodio de ola de calor se analiza en base a su duración, intensidad media e intensidad máxima alcanzada durante dicho episodio.

45.1 DURACIÓN

La duración de una episodio de ola de calor se define como el número de días consecutivos en los que se cumple que la temperatura máxima es superior al umbral establecido.

45.2 INTENSIDAD MEDIA

La intensidad media de un episodio de ola de calor es el promedio de los valores de temperatura máxima registrados en los días que constituyen el episodio de ola de calor.

45.3 INTENSIDAD MÁXIMA

La intensidad máxima de un episodio de ola de calor es el valor más extremo de los valores de temperatura máxima registrados en los días que constituyen el episodio de ola de calor.

REFERENCIAS

Gaitan, E., Monjo, R., Portoles, J., Pino-Otin, M.R., 2019. Projection of temperatures and heat and cold waves for Aragon (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs. *Sci. Total Environ.* 650, 2778–2795

46. ÍNDICES BIOCLIM

Los índices bioclimáticos son variables calculadas a partir de los valores mensuales de temperatura y precipitación y que tienen interés desde el punto de vista biológico. Suelen utilizarse en la modelización de la distribución de las especies y en las técnicas de modelización ecológica relacionadas. Las variables bioclimáticas representan las tendencias anuales (por ejemplo, la temperatura media anual, la precipitación anual); la estacionalidad (por ejemplo, el rango anual de temperatura y precipitación) y los factores ambientales extremos o limitantes (por ejemplo, la temperatura del mes más frío y más cálido, y la

precipitación de los trimestres húmedos y secos). La tabla 46.1 muestra las definiciones de los 19 índices bioclimáticos calculados.

Índice	Descripción	Unidad
BIO1	Temperatura media anual	°C
BIO2	Amplitud térmica media diaria	°C
BIO3	Isotermalidad	%
BIO4	Estacionalidad de la temperatura	%
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	°C
BIO7	Amplitud térmica anual	°C
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	°C
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	°C
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	°C
BIO12	Precipitación anual	mm
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	mm
BIO14	Precipitación del mes más seco	mm
BIO15	Estacionalidad de la precipitación	%
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	mm
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	mm
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	mm

Tabla 46.1. Definición de los 19 índices bioclimáticos calculados.

47. ÍNDICES VITÍCOLAS

La vid es una planta que depende fuertemente de los factores meteorológicos (temperatura, precipitación e insolación) y de las características geográficas del viñedo (orientación, latitud, altura, etc.) para su óptimo desarrollo. Ciertos fenómenos meteorológicos, como las heladas, las olas de calor y las inundaciones, pueden ser determinantes (según el estado fenológico en el que se encuentre la planta) para que la calidad y cantidad de una cosecha sean las adecuadas. En Andalucía, hay siete denominaciones de origen y un Vino de Calidad (Lebrija). Por ello, disponer de información climática futura de aquellas variables que tienen una implicación directa en el viñedo y en la vid será de gran utilidad para la toma de decisiones relacionadas con este cultivo.

Siguiendo las recomendaciones de la OIV (Organización Internacional de la Viña y el Vino) en OIV, 2012, se propone analizar los siguientes indicadores climáticos:

Índices propuestos	
Tm_veg	Temperatura media en el periodo vegetativo
Tn_veg	Temperatura mínima en el periodo vegetativo
Tx_veg	Temperatura máxima en el periodo vegetativo
WI	Índice de Winkler
BEDD	Grados-día biológicamente efectivos
HI	Índice heliotérmico de Huglin
CNI	Índice de frío nocturno
FSI	Índice de Fregoni Simplificado
BI*	Índice de Branas, Bernon y Levadoux
Tn_rest	Temperatura mínima del periodo de reposo vegetativo

Tabla 47.1. Listado de indicadores climáticos propuestos en OIV 2012 (* Indicador no incluido en OIV 2012 pero propuesto para este estudio). Periodo vegetativo: abril a octubre. Periodo de reposo vegetativo: noviembre a marzo.

47.1 TEMPERATURA MEDIA EN EL PERIODO VEGETATIVO

Temperatura media para el periodo vegetativo calculada como la temperatura media diaria correspondiente al periodo entre abril y octubre.

$$Tm_veg = \bar{T}_{\text{mean}} (\text{abril a octubre})$$

47.2 TEMPERATURA MÍNIMA EN EL PERIODO VEGETATIVO

Temperatura mínima para el periodo vegetativo calculada como la temperatura mínima media diaria correspondiente al periodo entre abril y octubre. Los daños en las vides se producen normalmente con temperaturas por debajo de los -3°C.

$$Tn_veg = \bar{T}_{min} \text{ (abril a octubre)}$$

47.3 TEMPERATURA MÁXIMA EN EL PERIODO VEGETATIVO

Temperatura máxima para el periodo vegetativo calculada como la temperatura máxima media diaria correspondiente al periodo entre abril y octubre. Las consecuencias de las altas temperaturas sobre la vid son diversas en función de su duración, recursos hídricos, fase de vegetación y genotipo pero se puede considerar que, por encima de los 35°C, la capacidad de fotosíntesis de la vid decrece y el contenido en antocianinos de la uva se ve afectado.

$$Tx_veg = \bar{T}_{max} \text{ (abril a octubre)}$$

47.4 ÍNDICE DE FRÍO NOCTURNO

El índice de frescor nocturno (CNI) es un índice térmico basado en la temperatura nocturna durante el periodo de maduración (correspondiente al mes de Septiembre) (Tonietto, 1999).

$$CNI = \bar{T}_{min} \text{ (septiembre)}$$

CI	Características
≥25	—
18 -25	Noches cálidas
14 -18	Noches templadas
12-14	Noches frías
6-12	Noches muy frías
≤6	—

Tabla 47.4.1. Clasificación de los tipos de noches en función del índice CNI.

47.5 TEMPERATURA MÍNIMA DEL PERIODO DE REPOSO VEGETATIVO

Temperatura mínima para el periodo de reposo vegetativo calculada como la temperatura mínima media diaria correspondiente al periodo entre noviembre y marzo. A partir de un umbral se pueden producir daños irreversibles con respecto a la viabilidad de las yemas o de la cepa al completo. Aunque depende del material vegetal y de la fuerza de la vid, el umbral de resistencia de la vid a las bajas temperaturas oscila entre -15°C y -25°C (Düring, 1997; Lisek, 2009).

$$T_{n_rest} = \bar{T}_{\min} (\text{noviembre a marzo})$$

47.6 ÍNDICE DE WINKLER

Este índice caracteriza la idoneidad, en general del tipo de viticultura y de las variedades en particular, en localizaciones concretas. La clasificación de Winkler se basa en la acumulación de calor durante el periodo vegetativo (abril a octubre). Se calcula como la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura activa. En este caso, la temperatura activa elegida es de 10°C , temperatura a partir de la cual la planta abandona el reposo vegetativo.

$$IW = \sum_{1.4}^{31.10} (T_m - T_a)$$

con $T_a=10^{\circ}\text{C}$

dónde T_m es la media diaria y T_a la temperatura activa.

Según el índice de Winkler obtenido, la región se engloba en una categoría u otra (desde la I a la V) cuyas características, a rasgos generales, se resumen en la tabla 47.6.1 (Amerine y Winkler 1944).

Región	IW	Características
I	≤ 1372	Condiciones óptimas para el desarrollo de vino seco de mesa de primera calidad. No apto para variedades de gran desarrollo vegetativo.
II	(1372,1650]	Los valles pueden producir la mayoría de clases de vinos buenos comunes. Las zonas de ladera no son buenas para vinos comunes pero sí pueden producir vinos finos.
III	(1651,1927]	Clima cálido que favorece el alto contenido en azúcar, y si el clima es muy cálido también bajo en ácidos. No se producen los vinos secos de mayor calidad (esto ocurre en las zonas I y II) pero se producen vinos dulces naturales excelentes. Si el suelo es fértil pueden producirse buenos vinos comunes.
IV	(1927,2204]	Posibilidad de vinos naturales dulces, pero si es muy cálido tienden a ser bajos en acidez. Los vinos tintos de mesa y los blancos comunes son satisfactorios si se proceden de variedades con acidez alta. Zona de posible riego
V	>2204	Posibilidad de hacer vinos comunes, blancos y tintos, con acidez alta. Vinos de postre muy buenos. Zona de riego.

Tabla 47.6.1. Clasificación climática según el índice de Winkler. Esta clasificación es orientativa, ya que hay que tener en cuenta las características geográficas de la zona y las características del suelo. Fuente: Winkler, 1974.

47.7 GRADOS-DÍA BIOLÓGICAMENTE EFECTIVOS

Al igual que la vid no experimenta un crecimiento significativo por debajo de los 10°C, el crecimiento deja de ser significativo cuando supera los 19°C, por lo que en el cálculo de los grados-día se puede restringir su límite superior a 9°C por día. Considerando esta limitación, el calor acumulado en un periodo dado es inferior al que se obtiene sin restricciones de ningún tipo (véase índice de Winkler).

El índice de Grados-día biológicamente efectivos BEDD (siglas del inglés, Biologically effective degree days), es un parámetro definido para estudiar el crecimiento activo de la planta a partir de los grados-día durante el periodo vegetativo (del 1 de Abril al 31 de Octubre), considerando como límite de incremento de temperatura efectivo en un día 9°C (Gladstone, 2004).

47.8 ÍNDICE HELIOTÉRMICO DE HUGLIN

El índice heliotérmico de Huglin permite evaluar, como su nombre indica, las posibilidades heliotérmicas de un medio vitícola. El IH define la temperatura del periodo en el que la fotosíntesis es activa e informa del potencial de azúcar (Huglin 1978), calculado entre el 1 de Abril y el 30 de Septiembre.

$$IH = \sum_{1.4}^{30.9} \frac{(T_{media} - T_a) + (T_{max} - T_a)}{2} .d$$

con $T_a=10^{\circ}\text{C}$ y $d=1,02$

donde T_{media} y T_{max} son la temperatura media y máxima diaria, T_a la temperatura activa y d es un parámetro que depende de la latitud. La tabla 47.8.1 recoge los valores de este Índice.

Región	IH	Características
I	≤ 1500	Demasiado frío o muy frío
II	(1500,1800]	Frío
III	(1800,2100]	Templado
IV	(2100,2400]	Templado-cálido
V	(2400,3000]	Cálido o muy cálido
VI	>3000	Demasiado cálido

Tabla 47.8.1. Clasificación climática según el índice de Huglin. Estos datos son de carácter orientativo, hay que considerar otros datos como características del suelo y características geográficas.

47.9 ÍNDICE DE BRANAS, BERNON Y LEVADOUX

El Mildiu es un hongo que si se desarrolla bajo las condiciones óptimas puede atacar a todos los órganos verdes de la vid. La temperatura óptima para el desarrollo de la enfermedad es de 12°C y las condiciones pluviométricas iniciales han de ser de precipitaciones con al menos 10 mm. Una vez desarrollado solo necesita agua libre (como rocío) para desarrollarse.

Mediante el índice Branas, Bernon y Levadoux, también denominado índice Hidrotérmico (BI) (Branas et al. 1946, 1974) se puede estudiar las posibilidades de que se desarrolle el Mildiu. Para valores del índice superiores a 1500 (en la Península Ibérica) su desarrollo es posible.

El cálculo del índice depende de la temperatura media y de las precipitaciones a escala mensual.

$$BI = \sum_{Abril}^{Agosto} T_{media} * P$$

Dónde P es la precipitación mensual y T_{media} la temperatura media mensual.

47.10 ÍNDICE DE FREGONI SIMPLIFICADO

El índice de Fregoni (Fregoni y Pezzuto, 2000) integra tanto la amplitud térmica diurna como la duración del período en el que la temperatura se mantiene por debajo de los 10°C y por un período de 30 días anteriores a la madurez de la uva (mes de septiembre).

$$IFs = \sum_{1.9}^{30.9} (Tx - Tn) * \sum_{1.9}^{30.9} Nd(Tn < 10)$$

donde Tx es la temperatura máxima, Tn es la temperatura mínima y N_d es el número de días del mes con temperatura media inferior a 10°C.

Tras los cálculos preliminares, este índice ha sido descartado ya que durante el mes de Septiembre en Andalucía las temperaturas medias son superiores a 10°C.

REFERENCIAS

Amerine, M.A. y A.J. Winkler. 1944. Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia*. 15(6): 493-673.

Branas J. Viticulture générale. Dehan, Montpellier. 1974; 990 p

Branas J, Bernon G, Levadoux L. éléments de viticulture générale 1946.

Castroviejo, S. AL.(Coord. Gen.). 1986-2012. *Flora iberica*, 1-8.

de la Torre, J. R., Viñas, J. I. G., Jacobo Ruiz del Castillo y de Navascués, & Cardo, Ó. G. (2006). *Flora mayor*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.

Düring, H. 1997. Potential frost resistance of grape: Kinetics of temperature-induced hardening of Riesling and Silvaner buds. *Vitis*. 36(4): 213-214.

Fregoni, C. y S. Pezzutto. 2000. Principes et premières approches de l'indice de qualité. Fregoni. *Progr.Agric.Vitic.* 117: 390-396.

Gastón, A., & Garcia-Vinas, J. I. (2011). Modelling species distributions with penalised logistic regressions: A comparison with maximum entropy models. *Ecological modelling*, 222(13), 2037-2041.

Gladstones, J.S. (2004) Climate and Australian viticulture. In: Viticulture volume 1 – Resources. Eds. P.R. Dry and B.G. Coombe (Winetitles: Adelaide) pp. 90–118. · Grace, W, Sadras, V.O. and Hayman, P.T. (2009). Modelling heatwaves in viticultural regions of southeastern Australia. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 58, 249-262.

Huglin, P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. Informe de la Academia de la Agricultura de Francia. 64: 1117-1126. · Jones, G. V.

(2004). Making Wine in a Changing Climate. *Geotimes*, August 2004, Vol. 50, No. 7, pp. 22-27.

Iturbide, M., Bedia, J., & Gutiérrez, J. M. (2018). Background sampling and transferability of species distribution model ensembles under climate change. *Global and Planetary Change*, 166, 19-29.

Lisek, J. 2009. Frost damage of buds on one-year-old shoots of wine and table grapevine cultivars in Central Poland following the winter of 2008/2009. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. 17(2): 149-161.

Miranda, R. A. (2009). *Regiones de procedencia de especies forestales españolas*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.

OIV 2012 “líneas directrices de la oiv sobre metodologías de zonificación vitivinícola a nivel del suelo y del clima” (RESOLUCIÓN OIV-VITI 423-2012 REV1).