

3.2.

Realización y validación de los mapas

La información de base en la cartografía climática son los registros puntuales de las variables climáticas medidas en estaciones meteorológicas, series que en nuestro caso y según hemos visto en el apartado anterior es preciso sean sometidas a un riguroso control previo de calidad.

Frente a la cartografía de otro tipo de variables ambientales de las que se dispone de información en todo el territorio, el carácter puntual de la información climática dificulta la elaboración de mapas. Aunque las variables climáticas sean continuas en el espacio, solamente conocemos los registros en pocos puntos y es a partir de esos pocos puntos desde los que debemos de espacializar los registros al resto del territorio. Así, en los puntos en los que no se dispone de información se ha de estimar el valor de la variable climática a cartografiar, siendo en definitiva los mapas climáticos predicciones que se pretende tengan un elevado grado de ajuste con la realidad.

Existen diferentes métodos para la realización de cartografías climáticas. Los métodos tradicionales, basados en un criterio experto y realización manual de las cartografías, han dejado paso a técnicas modernas basadas en procedimientos estadísticos y técnicas de cartografía automática. La gran capacidad de cálculo de los actuales sistemas informáticos permite la realización de análisis encaminados a la predicción de los registros climáticos en aquellos puntos del espacio en los que no se dispone de información.

También entre estos métodos automáticos existen distintas opciones, que difieren entre sí tanto en su concepción teórica como en su formulación matemática. Estos métodos se pueden dividir en métodos locales, que únicamente tienen en cuenta los datos de la variable climática registrada en los observatorios meteorológicos, y en globales, que además de los datos anteriores, utilizan información auxiliar de carácter geográfico y/o topográfico.

Los métodos locales llevan a cabo la predicción climática en un punto del espacio a partir de la información de los puntos de muestreo más cercanos, estimando el valor de la variable cartografiada en función de los datos de los observatorios vecinos.

El proceso es espacialmente continuo y finaliza cuando se ha obtenido una predicción en todos los puntos. En cambio, los métodos globales utilizan la información de todas las estaciones meteorológicas disponibles en el territorio para la predicción de la variable climática en cualquier punto de éste. Para la estimación se genera un modelo de dependencia entre los datos climáticos y otras variables independientes.

Ambos tipos de métodos, por si solos, presentan algunas ventajas e inconvenientes. En el caso de los métodos globales, la interpolación obtiene el patrón general de variación espacial de la variable climática, siendo los resultados menos independientes de la distribución espacial de la red de muestreo. Por el contrario, este tipo de métodos registran mal las variaciones locales del clima. En cambio, los métodos locales registran mejor las variaciones de carácter local, aunque los resultados están mucho más condicionados por la distribución espacial de la red de muestreo, con errores importantes ante la presencia de accidentes geográficos pronunciados y redes de muestreo poco densas.

Para contar con las ventajas que ofrecen ambos tipos de métodos y evitar sus inconvenientes, es posible su combinación, planteando un procedimiento mixto en el que inicialmente se examinan las relaciones físicas entre los datos climáticos y diferentes variables geográficas y topográficas, y posteriormente se tiene en cuenta la correlación espacial entre la información recogida en los observatorios meteorológicos.

El procedimiento cartográfico comienza con la selección de una serie de variables independientes que tiene un importante papel en la explicación de la variabilidad espacial de diferentes elementos del clima. Estas variables corresponden a capas en formato ráster obtenidas a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) o de diferentes procedimientos de análisis, fundamentalmente cálculo de distancias en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se obtuvieron a una resolución espacial de 100 metros de celda, cubriendo todo el territorio aragonés. Esta resolución espacial determina la definición de las cartografías climáticas finales.

Las variables independientes consideradas son la longitud, la latitud, la distancia al mar Mediterráneo, la distancia la mar Cantábrico, la elevación media con un radio de 1, 2.5, 5 y 10 Km, la radiación solar incidente con un radio de 1, 2.5, 5 y 10 Km y finalmente la distancia a los ríos.

Las variables topográficas permiten tener en cuenta la influencia de la altitud y de la exposición al explicar la distribución espacial de las variables climáticas, aunque otras variables del terreno también se utilizaron como predictores, principalmente la distancia a los mares Cantábrico y Mediterráneo, que explican la posición de cada celda respecto a las direcciones principales de las masas de aire que llegan a la región y que afectan de forma muy importante al clima de Aragón. También se incluyeron algunas variables relacionadas con el efecto de las inversiones térmicas (distancia a ríos), además de la latitud, longitud y la radiación solar que de forma potencial recibe cada punto del espacio en función de su relieve, que informa sobre la exposición y permite considerar el efecto de las flujos de viento de diferente dirección sobre la distribución espacial de precipitaciones y temperaturas. Los efectos orográficos a diferentes escalas espaciales también se tuvieron en cuenta mediante la aplicación de filtros de paso bajo (2.5, 5 y 10 km) a las variables topográficas.

En la figura 3 se muestra la distribución espacial de cuatro de estas variables independientes como ejemplo: distancia al mar Mediterráneo, distancia a los ríos principales, elevación y elevación filtrada a 10 km. Se puede observar que en cada caso son datos distribuidos espacialmente que corresponden a capas de información con las que se puede operar mediante álgebra de capas en Sistemas de Información Geográfica.

El proceso de interpolación propiamente dicho comienza con la selección de los observatorios meteorológicos que tomarán parte en el proceso. De los observatorios pluviométricos y térmicos (temperaturas máximas y mínimas) disponibles, se seleccionó aleatoriamente una muestra del 80%. El 20% restante se reservaron para testar los mapas y comprobar su validez. En todos los casos el periodo utilizado para la cartografía se normalizó al 1970-2000.

En cada uno de los observatorios se obtuvo el valor de cada una de las variables topográficas y geográficas independientes, creando una base de datos a partir de la que se realizó un análisis de regresión para cada variable y mes. De acuerdo a este procedimiento el valor de la variable climática en los puntos donde no existe información se obtiene mediante la siguiente función de transferencia:

$$z(x) = b_0 + b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_nP_n$$

donde z es el valor predicho en el punto (x) , b_0, \dots, b_n son los coeficientes de la regresión, y P_1, \dots, P_n son los valores de las diferentes variables independientes en el punto x .

Se utilizó un análisis por pasos sucesivos, fijando un nivel de significación de 0.01 para seleccionar únicamente las variables independientes adecuadas. Para evitar problemas de multicolinealidad, como consecuencia de las elevadas correlaciones entre las variables independientes, se aplicó un test en el software SPSS *Statistical Package for Social Sciences*. De esta forma se pueden reconocer los modelos en los que la incertidumbre de los coeficientes es muy importante como consecuencia de la multicolinealidad, y utilizar un modelo con un menor número de parámetros.

Como ejemplo se muestra una ecuación resultante, correspondiente a la precipitación de abril, que se utiliza para la predicción de forma especializada mediante álgebra de capas en un entorno SIG:

$$\text{Precipitación} = 603.6 - \text{Radiación} \times 0.077 - \text{Distancia al Cantábrico} \times 0.0013 + \text{Elevación} \times 0.049 + \text{Distancia a ríos} \times 0.00071 + \text{Longitud} \times 1.303 - \text{Latitud} \times 1.507 + \text{Distancia al Mediterráneo} \times 0.00087 - \text{Elevación} \times 0.026$$

Dado que los resultados de la modelización no son exactos, es decir, que la aplicación de los modelos de regresión múltiple hace que las predicciones no coinciden con el valor medido en los observatorios meteorológicos. Existe un error conocido en la predicción final, denominado residual, causado por las variaciones locales del clima que no reproducen bien los modelos generales obtenidos mediante regresión múltiple.

Gracias al conocimiento de estos residuales es posible llevar a cabo una corrección de los modelos originales, teniendo en cuenta características climáticas de carácter más local, con la interpolación de los residuales. En cada observatorio el valor del residual se obtiene mediante:

$$\text{Residual} = \text{Observado} - \text{Predicho}$$

Ya que estos residuales están distribuidos irregularmente en el territorio es necesario interpolarlos para obtener mapas de corrección. La interpolación se realizó mediante un algoritmo de splines con tensión ($j = 400$), método exacto de carácter local donde una serie de funciones locales se adaptan a los valores a interpolar dentro de cada punto de medición.

De esta forma, con la suma del mapa de residuales interpolados y el mapa resultado de la predicción mediante los modelos de regresión, se modifican los resultados iniciales del modelo y se obtienen valores reales en los puntos de los observatorios meteorológicos.

$$\text{Observado} = \text{Predicho} + \text{Residual}$$

Mediante esta modelización de las variables climáticas a partir de regresiones múltiples y la corrección posterior por interpolación de residuales se obtuvieron 36 mapas promedio mensuales (12 de precipitaciones, 12 de temperaturas máximas y 12 de temperaturas mínimas) referidas en todos los casos al periodo 1970-2000.

Fig. 3. ► Distribución espacial de cuatro de las variables independientes utilizadas en el proceso de modelización: distancia al mar Mediterráneo, distancia a los ríos principales, elevación (modelo digital de elevaciones) y elevación filtrada a 10 km.

Estas cartografías se testaron mediante diferentes procedimientos estadísticos con objeto de evaluar su calidad y conocer el grado de concordancia entre la predicción-estimación realizada por los modelos y la realidad, para lo que se utilizaron los datos reales registrados del 20% de los observatorios, reservados en el proceso de modelización precisamente para esta validación.

Una vez validados, estos mapas constituyen la base para obtener mediante operaciones algebraicas entre capas en un entorno SIG otras cartografías referentes a distintas variables climáticas, como las temperaturas medias mensuales, estacionales y anual, medias de las máximas y mínimas estacionales y anual, precipitaciones estacionales y anual, evapotranspiración potencial (ETP), balance hídrico, índice de aridez, etc, e incluso para aplicados determinados criterios de clasificación basados en las temperaturas y precipitaciones, una propuesta de división climática de Aragón.

Otras cartografías, como las relacionadas con la nieve, granizo, número de días de helada, registros térmicos y pluviométricos excepcionales o los vientos, entre otros, fueron obtenidos a partir de la base de datos diarios mediante diferentes métodos de interpolación elegidos según su mayor o menor ajuste a los datos observados expresado por el valor de los estadísticos utilizados en el proceso de validación de los mapas.

El valor de estas cartografías no se limita únicamente al que pueda derivarse de su publicación en este Atlas Climático de Aragón. Como hemos visto, los mapas que aquí se presentan son fruto de la modelización de los distintos parámetros climáticos en un entorno SIG de trabajo con objeto de convertir una información puntual, registrada en observatorios climáticos instrumentales, en capas de información continua cuya expresión territorial viene determinada por un conjunto de factores que se han tenido en cuenta en el proceso metodológico que lleva hasta el mapa final.

El resultado son capas digitales que en nuestro caso tienen una resolución espacial de 100 mts y que nos permiten visualizar gráficamente y con un alto grado de fiabilidad la distribución espacial de las variables climáticas sobre el territorio, pero nos posibilita además integrar esa información relativa al clima junto a otras variables de tipo ambiental en diferentes estudios que sobre el medio natural aragonés puedan a posteriori desarrollarse.

