Zubía Monográfico 20 119-142 Logroño 2008

CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DEL CLIMA EN LA RIOJA MODELIZADAS A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TÉCNICAS DE REGRESIÓN ESPACIAL

JOSÉ M. CUADRAT[1]
SERGIO M. VICENTE-SERRANO[2]

RESUMEN

En este trabajo se modeliza la distribución espacial de algunas variables climáticas en el conjunto de La Rioja mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión espacial. El resultado de los modelos son cartografías digitales a una resolución temporal mensual y espacial de 100 metros. Las cartografías tienen la ventaja de ser objetivas y automáticas, mejorando aproximaciones anteriores basadas en criterios expertos. Los modelos han permitido llevar a cabo una caracterización muy precisa del clima de La Rioja. Se presentan, a escala estacional y anual, los principales patrones espaciales del clima de La Rioja, incluyendo la precipitación, temperaturas, evapotranspiración y balance hídrico.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, Interpolación, Cartografía, variables climáticas, precipitación, evapotranspiración.

The spatial distribution of climate variables in La Rioja is modelled by means of geographical information systems and advanced spatial regression techniques. Application of models allows to obtain monthly digital maps of precipitation, temperature, evapotranspiration and water balance at a spatial resolution of 100 m. The maps are objective and they are obtained automatically using numerical methods. This approach improves previous maps based on subjective manual mapping. The maps allow to obtain accurate approximation to the average climate characteristics in La Rioja and to determine their spatial patterns.

Key words: *Geographical Information Systems, Interpolation, Climate mapping, climatic variiables, precipitation, evapotranspiration.*

1. Departamento de Geografía. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.

2. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Zaragoza, España. Campus de Aula Dei, P.O. Box 13034, Zaragoza 50080, Spain, svicen@ipe.csic.

0. INTRODUCCIÓN

Diferentes procesos ecológicos, económicos y sociales están determinados por las condiciones climáticas. Por ello, numerosas disciplinas como la agronomía, la biología, la ecología y la geografía utilizan información climática detallada con propósitos científicos y técnicos. Sin embargo, no es fácil disponer de información climática distribuida en el espacio como consecuencia del carácter puntual de las estaciones meteorológicas, su escasez y su desequilibrada distribución en el territorio. De hecho, es muy frecuente no disponer de información en aquellas zonas en la que es necesaria.

Para subsanar tal déficit de información, se han desarrollado diferentes métodos estadísticos que tratan de predecir el valor de las variables climáticas de interés en aquellas zonas en las que no existen estaciones meteorológicas (Daly *et al.* 2002, Ninyerola *et al.*, 2000 y 2007; Vicente-Serrano *et al.*, 2003 y 2007). No obstante, la predicción es problemática en áreas montañosas, pues la topografía genera una gran diversidad de microambientes, en los que el valor de las variables climáticas es difícil de determinar (Daly *et al.*, 1994). Las variaciones de la dirección e intensidad de los flujos de aire en estas zonas, su interacción con el relieve y la frecuente acumulación de aire frío en los fondos de valle dan lugar a fuertes variaciones climáticas entre áreas muy cercanas en el espacio. A ello se une el hecho de que en las zonas montañosas la red de observatorios todavía es más deficitaria y dispersa que en espacios llanos, siendo muy pocas las estaciones localizadas en cotas altas. Por lo tanto, la predicción por encima de un determinado umbral resulta muy compleja, pese al interés de la información climática en alta montaña tanto desde un punto de vista científico como aplicado, ya que algunas de las actividades humanas y numerosos procesos ecológicos se concentran en estas zonas.

En La Rioja se han producido varias aproximaciones a la cartografía de las variables climáticas desde los años setenta (ver, por ejemplo, los trabajos de Calvo Palacios, 1977; Sánchez Gabriel, 1989; Núñez y Martínez Abaigar, 1991; Cuadrat, 1994). En todos los casos se trata de cartografías manuales a partir de un "criterio de experto", mediante el trazado de isolíneas, para las cuales se utilizan los datos de los observatorios disponibles y el criterio del experto para la adecuada delimitación de los valores climáticos. En general, estos métodos simplifican excesivamente la realidad y reducen la variabilidad espacial real de las variables ambientales (Burrough y McDonnell, 1998).

Con el fin de superar tales limitaciones y cartografiar de forma más precisa la variabilidad climática real se han desarrollado en los últimos años diferentes técnicas de cartografía automática, que permiten estimaciones continuas de las variables climáticas. Los métodos son muy diversos y difieren enormemente en cuanto a su concepto y formulación matemática (Borrough y McDonnell 1998). La mayor parte de los métodos utilizan únicamente los valores de la variable climática en los puntos de observación. De este modo, las variables climáticas se interpolan espacialmente bien por

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

medio de métodos locales (Hutchinson, 1995; Blenow y Persson, 1998) o geoestadísticos (Goovaerts, 2000; Pardo-Igúzquiza, 1998). Aún con todo, la complejidad climática que introduce el relieve no es bien registrada, a menudo, con estos métodos. Más potentes se muestran los métodos globales de interpolación basados en la aplicación de técnicas de regresión múltiple en los que se incluyen diferentes variables geográficas y topográficas como predictores (e.g. Perry and Hollis, 2005; Beguería y Vicente-Serrano, 2006; López-Moreno y Nogués-Bravo, 2005, Ninyerola *et al*. 2000, Brown y Comrie, 2002). La utilización de este tipo de técnicas permite obtener muy buenas estimaciones de las variables climáticas en zonas montañosas en las que no se dispone de información (Ninyerola *et al*., 2007; Vicente-Serrano *et al*., 2007; López-Moreno *et al*., 2007).

En este trabajo se muestra una actualización de las cartografías climáticas para La Rioja con resolución estacional, mediante la aplicación de técnicas de regresión múltiple y sistemas de información geográfica, de las variables: precipitación, temperaturas máximas, mínimas y medias, evapotranspiración y balance hídrico. Las ventajas de estos documentos, frente a las cartografías anteriores, son su mayor fiabilidad al estar realizadas mediante métodos objetivos, permitir la predicción continua en todos los puntos del espacio y su disponibilidad digital.

1. METODOLOGÍA

1.1. Datos utilizados

Para llevar a cabo la cartografía se ha dispuesto de una base de datos térmica y pluviométrica para La Rioja del Instituto Nacional de Meteorología, en la que se incluyen un total de 31 observatorios pluviométricos y 21 termométricos localizados en La Rioja o en áreas circundantes (Figura 1). Las bases de datos en todos los observatorios están completas para el periodo entre 1970 y 2003.

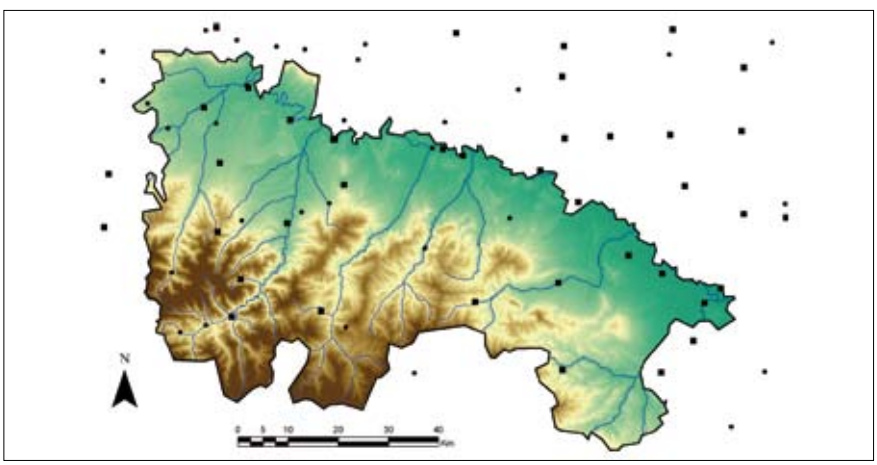

Figura 1. Distribución espacial de los observatorios de precipitación (círculos) y temperatura (cuadrados) para la elaboración de las cartografías climáticas de la Rioja.

Para estos observatorios se obtuvieron los promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, registrados entre 1970 y 2003. Habitualmente, se suele reservar una muestra de los observatorios para realizar las interpolaciones y un porcentaje de los disponibles para llevar a cabo una validación independiente. Sin embargo, dada la escasez de observatorios para la modelización, no se reservó una muestra para la validación con el fin de no afectar los resultados. A cambio se planteó una validación cruzada mediante un proceso de "jacknife", a partir de la realización de tantos modelos como observatorios disponibles y calculando el promedio de errores correspondiente a cada modelo.

La elevación suele ser la variable que más afecta a la distribución espacial del clima, si bien otras variables, como la latitud, longitud, distancia a los mares, etc., también influyen notablemente. Las variables independientes utilizadas en este trabajo se incluyen en la Tabla 1. La mayor parte de las mismas fueron obtenidas a partir de un modelo digital de elevaciones a una resolución espacial de 100 m. Las capas de distancias se obtuvieron mediante el módulo BUFFDIST del SIG MiraMon (Pons, 2007). Se incluyó una variable continua para tener en cuenta la orientación topográfica modelizada mediante un modelo potencial de radiación solar (Ninyerola *et al.*, 2000). Este modelo se calculó con apoyo del SIG MiraMon, de acuerdo al algoritmo propuesto por Pons (1996). Se aplicaron filtros de paso bajo con radio de 2.5, 5 y 25 km a las capas de elevación y radiación solar incidente para medir el efecto de estas variables a escalas espaciales más amplias.

Tabla 1.
Lista de covariables geográficas y topográficas utilizadas para la elaboración de los modelos de regresión espaciales

Latitud
Longitud
Distancia al mar
Distancia al mar Mediterráneo
Distancia al Océano Atlántico
Elevación en metros
Elevación en metros en un radio de x, donde x son 2.5, 5, y 25 km
Radiación solar incidente en MJ × día
Radiación solar incidente en MJ × día en un radio de x, donde x son 2.5, 5, y 25 km

1.2. Técnicas de regresión espacial

Este tipo de técnicas se basan en la creación de modelos de dependencia entre los datos climáticos y otras variables independientes, con la finalidad de predecir el valor de la variable en las áreas en las que no existe información. El valor de la variable climática es predicho mediante la siguiente función de transferencia:

$$z(x) = b_0 + b_1P_1 + b_2P_2 + ... + b_nP_n$$

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

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

Se obtuvo el valor de las variables independientes en los puntos correspondientes a la red de muestreo de los observatorios meteorológicos. Se llevó a cabo un análisis de regresión para cada uno de los 12 meses del año y tres variables (precipitación media, temperatura media de las máximas y de las mínimas). La normalidad de cada variable se testó mediante el test de Kolmogorov-Smirnoff. En los casos en los que no se aceptó la normalidad de la variable ($p > 0.05$), ésta fue transformada mediante logaritmos naturales. Como consecuencia de la elevada correlación entre algunas de las variables independientes, se siguió un procedimiento por pasos para obtener los modelos de regresión y así evitar los frecuentes problemas de colinealidad. Se fijó un valor de 0.01 para decidir la inclusión o no de las variables en el modelo, siguiendo las recomendaciones de Hair *et al.* (1998).

1.3. Validación

La validación de los modelos se realizó, tal como se ha indicado anteriormente, mediante un procedimiento de validación cruzada "jacknife" en el que se elaboraron tantos modelos como observatorios disponibles, obteniendo un valor de predicción para el observatorio no incluido en cada modelo. El cálculo del error medio absoluto entre los valores modelizados en dichos puntos y los observados por el modelo permite determinar el error medio de la predicción. Dichos errores se muestran en la Tabla 2. En el caso de las precipitaciones los valores de error son relativamente elevados respecto al rango total de la variable. En el caso de las temperaturas los resultados de los modelos muestran un mayor grado de ajuste, no superando en ningún caso valores superiores a un grado, tanto en el caso de las temperaturas máximas como en el de las mínimas.

Tabla 2.
Error Medio Absoluto de las estimaciones obtenidas mediante los modelos de regresión en las estaciones de La Rioja

	Precipitaciones	Temp. Maxima	Temp. Minima
Enero	18.81	0.32	0.54
Febrero	20.07	0.35	0.53
Marzo	15.80	0.58	0.73
Abril	16.34	0.42	0.57
Mayo	7.56	0.59	0.72
Junio	9.60	0.54	0.61
Julio	4.00	0.45	0.75
Agosto	5.78	0.59	0.82
Septiembre	8.35	0.48	0.73
Octubre	15.48	0.36	0.59
Noviembre	18.48	0.31	0.61
Diciembre	17.77	0.44	0.60

1.4. Corrección local

Para corregir los problemas de los modelos de regresión, algo elevados en el caso de las precipitaciones, se ha llevado a cabo una corrección local de los errores. Como consecuencia del carácter global de los métodos de regresión, algunos rasgos locales pueden quedar no muy bien representados por los modelos. Hay que tener en cuenta que los interpoladores globales son inexactos, pues los valores predichos z(x) no coinciden con los valores reales registrados en las estaciones meteorológicas. Existe un error conocido en la predicción final (residual). Ninyerola *et al.* (2000 y 2007), Agnew y Palutikof (2000), Brown y Comrie (2002) y Vicente-Serrano *et al.* (2007), entre otros, llevaron a cabo una corrección de los modelos mediante una interpolación de los residuales para obtener datos exactos en la localización de las estaciones meteorológicas:

residual = dato observado – dato predicho

Para la interpolación de los residuales se utilizó un método local adaptativo: spliners con tensión ($\varphi = 400$) (Mitasova y Mitas 1993). Este método se ha mostrado más adecuado que otros para este propósito (Ninyerola *et al.*, 2007; Vicente-Serrano *et al.*, 2003). La suma de los residuales interpolados y de los mapas resultantes de la aplicación de los modelos de regresión modifica los resultados iniciales del modelo, obteniendo valores reales en la localización de los observatorios meteorológicos y aumentando la bondad y calidad final de las cartografías:

Dato observado = dato predicho + interpolación de residuales

1.5. Cálculo de variables derivadas

A partir de las cartografías de temperaturas máximas y mínimas y precipitaciones se obtuvieron una serie de variables derivadas, entre ellas las temperaturas medias, a partir del simple promedio de máximas y mínimas. La evapotranspiración potencial se obtuvo mediante el método de Hargreaves (Hargreaves, 1985), a partir de álgebra de capas y el cálculo de un modelo de radiación potencial. El método permite calcular la evapotranspiración potencial en mm. El procedimiento detallado se puede consultar en Vicente-Serrano *et al.* (2007).

A partir de las capas de precipitación y evapotranspiración se obtuvo un balance climático simple, mediante la resta entre ambas capas. Aquellas zonas con balances negativos presentarán déficits hídricos en algunos meses, mientras que valores positivos indicarán áreas excedentarias de recursos hídricos.

2. RESULTADOS

2.1. Precipitaciones y su régimen estacional

La distribución espacial de las precipitaciones refleja claramente la influencia decisiva del relieve y la mejor exposición del sector occidental a los vientos húmedos del Atlántico. En efecto, las lluvias se reparten de modo

muy desigual entre la montaña y el llano, y sufren a la vez un claro proceso de degradación Oeste-Este (Figura 2). En la ribera del Ebro el promedio anual de lluvias es inferior a 500 milímetros y se reduce a menos de 400 mm en la franja centro oriental, que se convierte de este modo en el sector más seco de La Rioja, ya en transición hacia las condiciones semiáridas del centro del Valle del Ebro. La moderación de estos valores se proyecta en parte hacia el Sur a través de los valles abiertos por los ríos Alhama, Cidacos, Leza e Iregua; pero de forma general la humedad aumenta, dibujando la gradual transición entre la debilidad pluviométrica del eje del Ebro y los importantes registros de las sierras meridionales. En plena sierra se acusa el efecto orográfico y se genera una extensa franja húmeda, con lluvias frecuentes y abundantes, que como en el caso de las superficies bien expuestas de la sierra de la Demanda alcanzan los 1200 mm, en torno a los 1000 metros de altitud. No obstante, la gran compartimentación del relieve y las variadas orientaciones que existen en la montaña implican fuertes diferencias en los totales de precipitación y, en ocasiones, verdaderas "inversiones pluviométricas", que se hacen más evidentes en aquellos valles de montaña encerrados entre grandes elevaciones, como es el caso de los cursos altos de los ríos Iregua y Cidacos.

Al gradiente altitudinal se une el zonal Oeste-Este, relacionado con la posición relativa respecto a los temporales de procedencia atlántica y al descenso topográfico existente en el mismo sentido, de modo que conforme se avanza hacia el levante las lluvias son cada vez más débiles y el ambiente más seco. Siguiendo el eje del Ebro, en La Rioja Alta, en contacto con las tierras vascas, las precipitaciones superan con generosidad los 500 mm, pero con dificultad llegan a 400 mm en algunos sectores de La Rioja Baja; diferencias aún mayores se observan en el sector de montaña de un extremo y otro de la región.

A escala estacional la primavera es la época más lluviosa del año, mientras la importancia del resto de las estaciones varía en función de las características del clima de cada observatorio (Figuras 2 y 3). Así, en los sectores de mayor influencia oceánica, como La Rioja Alta y sierras de la Demanda, Urbión y Cebollera, las lluvias de invierno son muy abundantes, llegando a constituir el máximo secundario (casos de Posadas y Haro), que algunos años llega a ser tan importante como el máximo primaveral, mientras que el verano y el otoño son las estaciones más secas. En La Rioja Baja y en las montaña orientales, de condiciones cada vez más mediterráneas, las lluvias otoñales son cada vez más abundantes y el régimen pasa a ser equinoccial, con el máximo principal en primavera y el secundario en otoño, separados por dos mínimos en invierno y verano bastante parecidos (ver gráficas de Munilla y Alfaro). Evidentemente, los límites entre las diferentes regiones pluviométricas no son precisos, sino que se pasa de una a otras a través de franjas de transición de amplitud variable según la influencia del relieve.

Los tres meses primaverales reciben entre el 30 y el 35% de las precipitaciones, aunque con grandes contrastes entre sectores, como lo demuestran los cerca de 125 mm de La Rioja Baja y los más de 300 mm de la sierra

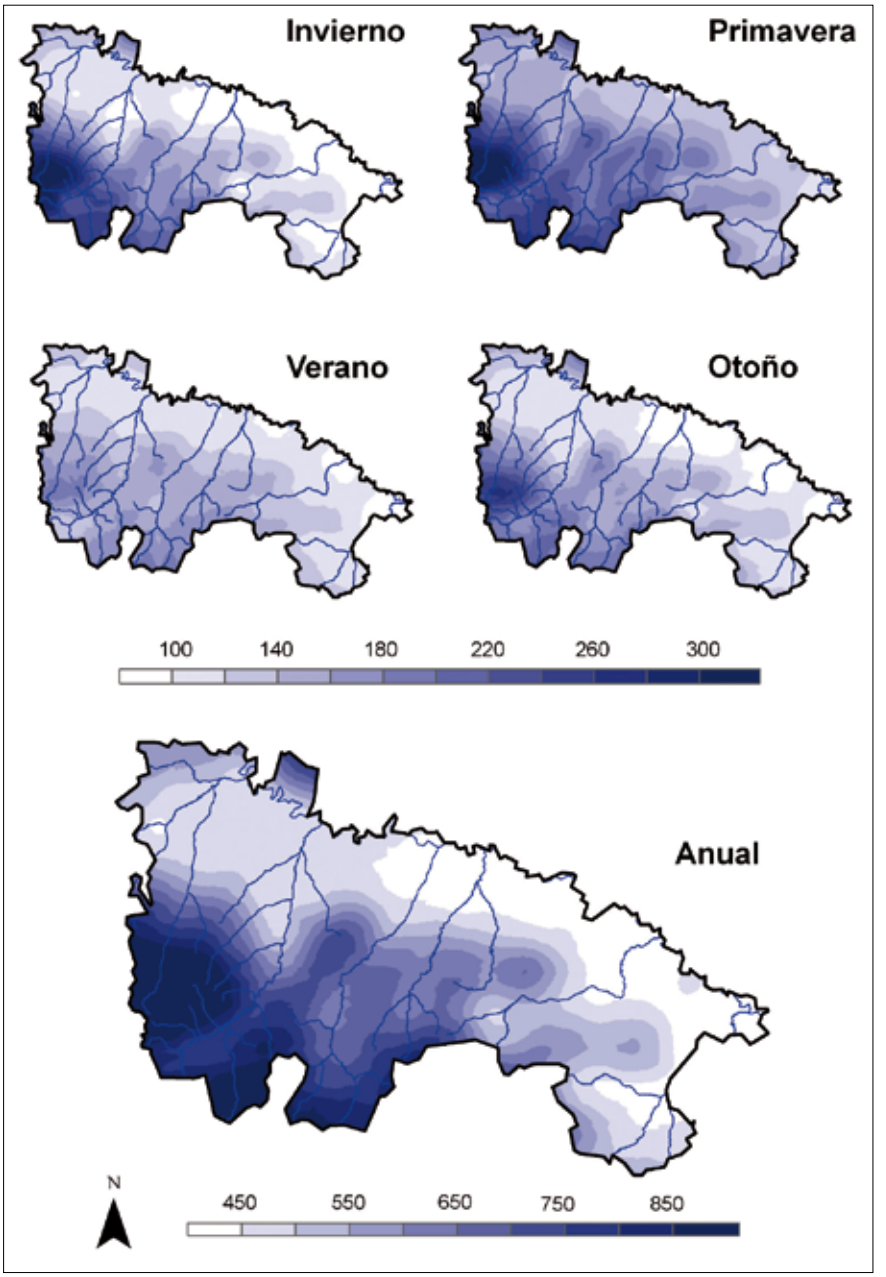

Figura 2. Distribución espacial de los valores pluviométricos anual y estacional en La Rioja (datos en mm.).

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

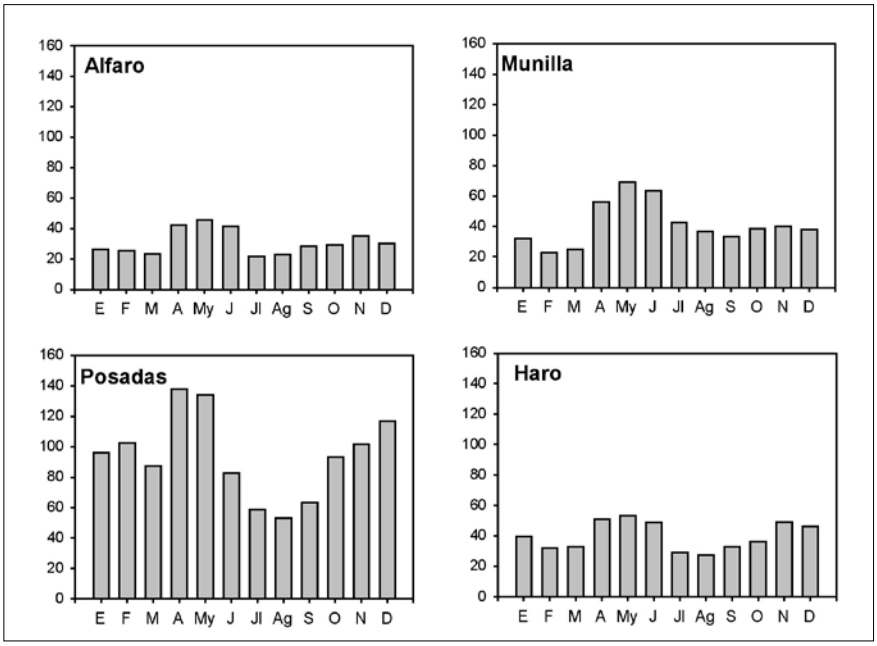

Figura 3. Valores medios de precipitación mensual en cuatro observatorios representativos de diferentes ámbitos geográficos de La Rioja.

de la Demanda. En el detalle mensual, marzo es un mes típico de transición que da paso a las abundantes lluvias de abril y mayo, fechas en que se unen las precipitaciones frontales propias de la estación y las lluvias de inestabilidad convectiva ligadas a la topografía local.

En junio se reciben todavía copiosas lluvias, pero descienden rápidamente en julio y agosto, al igual que ocurre en todo el ámbito mediterráneo. El mapa de isoyetas muestra cómo las lluvias registradas son inferiores a los 100 mm en La Rioja Media y con dificultad superan los 140 mm en las áreas mejor expuestas de la sierra de la Demanda. La monotonía del verano se conserva todavía en septiembre, que es el mes más seco del año en algunos sectores riojanos, pero en octubre y aún más en noviembre, las precipitaciones se generalizan y con ellas entramos en los meses propiamente otoñales, de fuertes contrastes atmosféricos y sin un patrón espacial bien definido, como se observa en el mapa de porcentajes (Figura 4). En invierno las lluvias aumentan y constituyen un máximo secundario generalizado en el sector occidental de acusada influencia atlántica, donde en ocasiones pueden llegar a proporcionar hasta una tercera parte de la precipitación anual (como en la sierra de la Demanda), debido sobre todo a las abundantes lluvias de diciembre y febrero (Posadas). Las tierras orientales acusan con mayor intensidad la frecuente presencia de anticiclones sobre el suelo peninsular, que bloquean la llegada de borrascas oceánicas; su baja precipitación ocasiona un importante mínimo estacional, similar al que se observa en verano. Estas características explican que sea esta la época de mayor contraste plu-

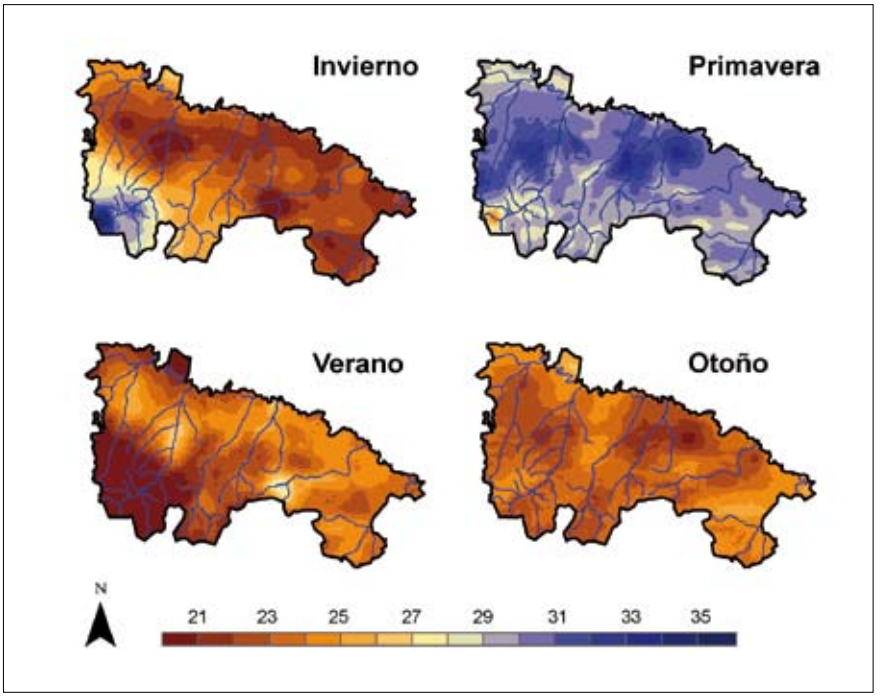

Figura 4. Distribución espacial del régimen estacional de precipitaciones en La Rioja (datos en porcentajes).

viométrico, como evidencia el mapa trazado: en la sierra de la Demanda se registran cantidades superiores a los 300 mm de lluvia (más del 35% de la precipitación caída en todo el año); por el contrario, hacia el Este son cada vez menores y en el extremo oriental de la región no se suman los 100 mm (menos del 20 % anual) durante los tres meses invernales.

2.2. Temperaturas medias, máximas y mínimas

A pesar de la reducida extensión del territorio riojano, los contrastes y la diversidad son la nota dominante de las temperaturas. Desde la templanza de los 12-14ºC de temperatura media anual del llano hasta el frío que indican los menos de 6ºC de las principales sierras riojanas, se suceden una amplia gama de valores térmicos, fruto de las diferencias topográficas y los matices en la continentalidad derivada de su posición en el interior de la Depresión del Ebro y la cercanía a la influencia atlántica.

Esta variedad térmica y, sobre todo, la fuerte dependencia del relieve se comprueban muy bien en los mapas de temperaturas (Figuras 5, 6 y 7). Las tierras ribereñas constituyen el sector más cálido, con valores anuales promedio en torno a 12ºC-13ºC, e incluso de 14ºC en el extremo oriental de La Rioja Baja. Al ascender hacia el piedemonte las temperaturas muestran un lógico descenso, al principio lento y luego con mayor rapidez cuando se alcanzan las vertientes montañosas. Y ya en plena montaña el termómetro

Zubía Monográfico | núm. 20 (2008), pp. 119-142
ISSN 1131-5423

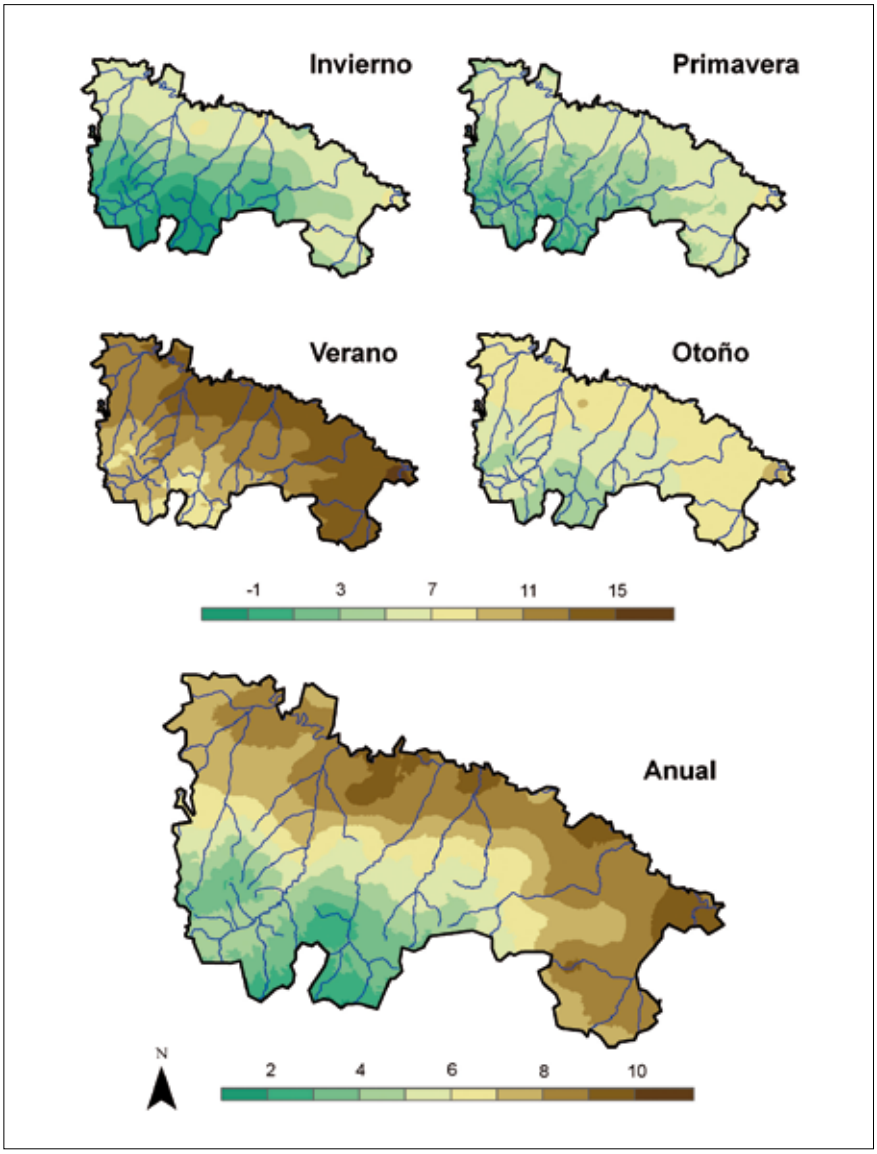

Figura 5. Distribución espacial de los valores de temperaturas medias de las mínimas anual y estacional en La Rioja (datos en ºC).

alcanza sus cifras más bajas, marcando de este modo el fuerte contraste existente con el llano: en las sierras de la Demanda, Urbión o Cebollera los promedios no llegan a los 6ºC. Por otra parte, en la montaña la exposición es decisiva en el momento de enjuiciar los datos térmicos, pues los contrastes entre solana y umbría son acusados y sus efectos muy sensibles para la creación de variedad de climas locales o topoclimas.

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

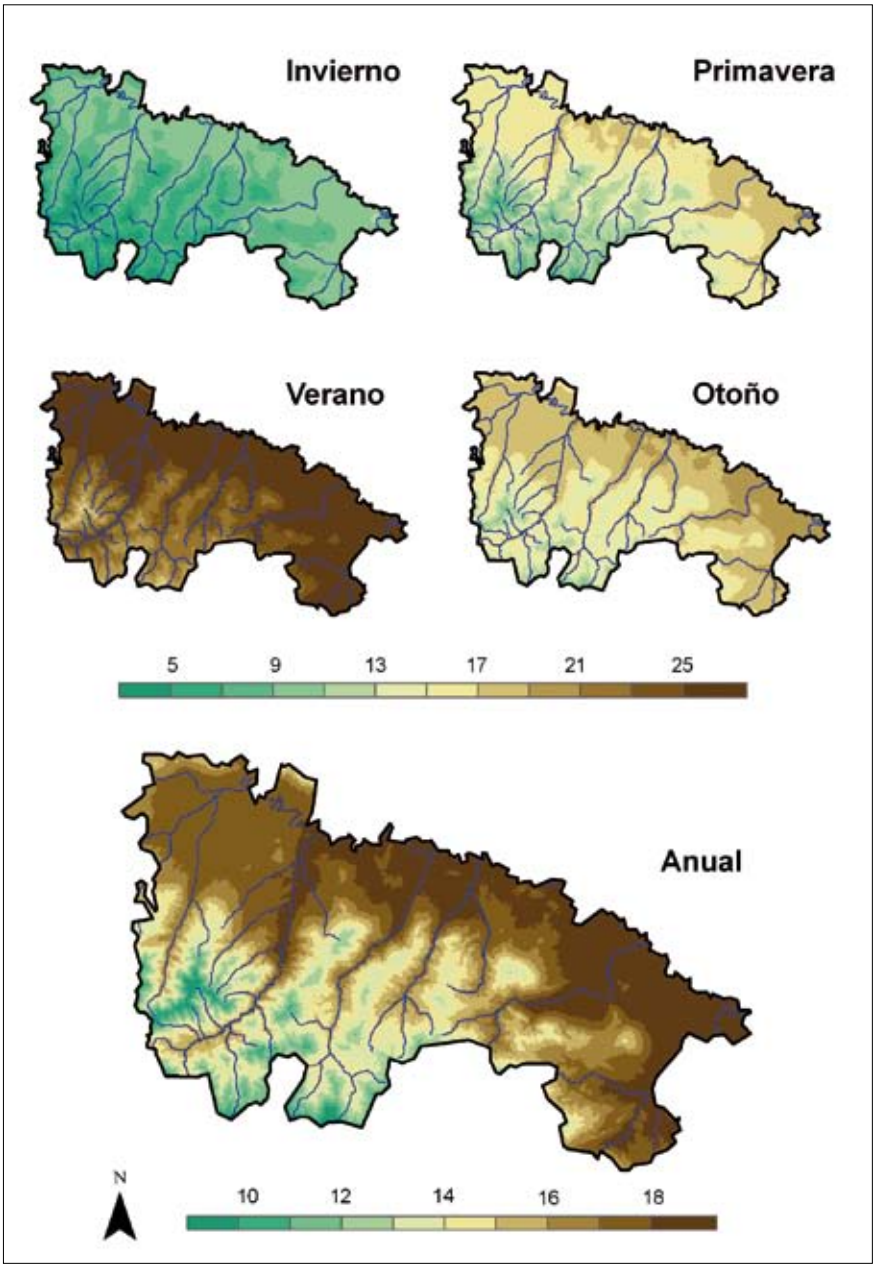

Figura 6. Distribución espacial de los valores de temperatura media de las máximas anual y estacional en La Rioja (datos en ºC).

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

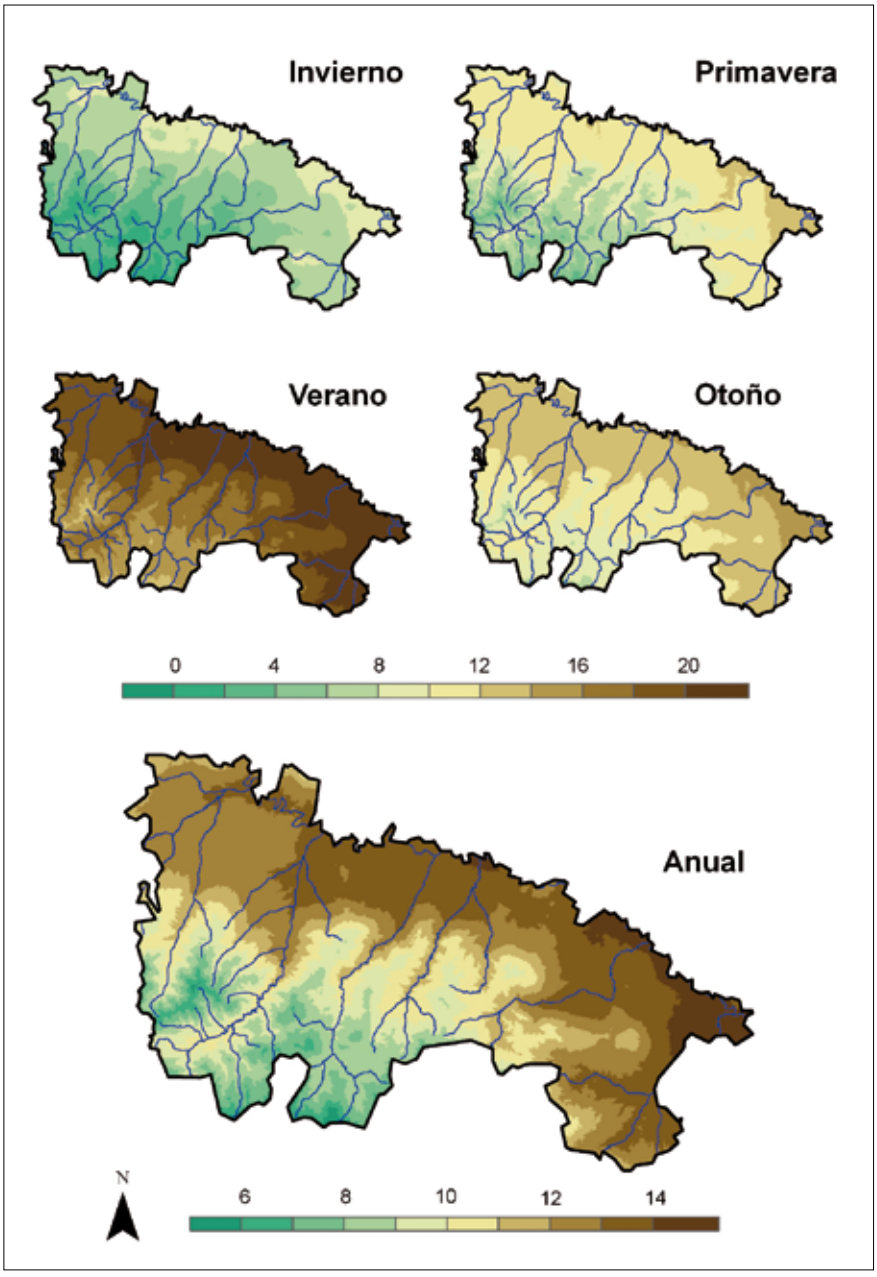

Figura 7. Distribución espacial de los valores de temperatura media anual y estacional en La Rioja (datos en ºC).

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

Al igual que ocurre con las precipitaciones, junto a esta gradación tan evidente, existe otra menos perceptible Oeste-Este que responde, por un lado, al descenso altitudinal del territorio en este mismo sentido y, por otro lado, a las condiciones más continentales que soportan los sectores orientales: junto al Ebro en La Rioja Alta la temperatura media anual llega a ser inferior a 12ºC, aumentando progresivamente hacia el Este, de forma que en La Rioja Baja puede superar los 14ºC.

El ritmo térmico estacional y mensual, al igual que ocurre en el resto de la península Ibérica, dibuja una curva bastante sencilla: un mínimo en invierno y un máximo en verano, con ausencia de mínimos o máximos secundarios (Figura 8). Los valores más bajos se alcanzan siempre en enero y los más altos en julio, aunque en algunos observatorios pueden verse desplazados hasta agosto, pero tanto en uno como en otro caso la diferencia entre ambos es siempre inferior a 1ºC.

El ciclo térmico a lo largo del año es además muy regular. En octubre tiene lugar un apreciable descenso térmico, del orden de 5ºC, más acusado desde noviembre, con el que se inicia el periodo invernal. Los promedios mensuales más bajos se dan en enero, con valores próximos a los 5ºC en el sector de la Depresión del Ebro e inferiores a los 0ºC en las cresterías montañosas. Durante estos meses de invierno en toda la región las temperaturas son inferiores a los 10ºC y se mantienen por debajo de los 2ºC en las zonas altas de la Demanda, Urbión y Cebollera. En las sierras de Cameros y el conjunto moñtañoso oriental (Sierra de Alcarama, Sierra de las Cabezas, Sie-

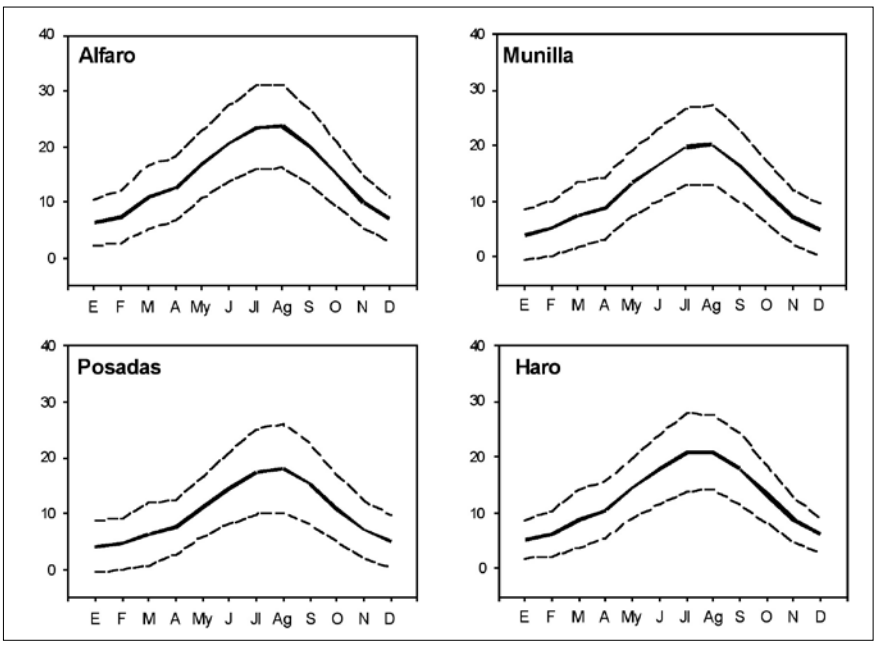

Figura 8. Valores medios de temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales en cuatro observatorios representativos de diferentes ámbitos geográficos de La Rioja.

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

rras de la Hez, Peñalmonte, Peña Isasa y la Sierra de Peñalosa) las cifras son también bajas, pero más suaves por su menor altitud (Figura 5). De enero a abril la temperatura sube de modo continuado, interrumpida por constantes descensos y la presencia de heladas nocturnas, pero en general la primavera es ya muy agradable en toda la ribera y buena parte del piedemonte, donde el termómetro se sitúa por encima de los 8ºC, mientras el frío se mantiene en parte en las sierras, con valores entre 4ºC y 6ºC. En mayo el ascenso es muy acentuado, en torno a 4ºC, debido al caldeamiento solar, y la misma tendencia sigue el mes de junio, que marca el paso hacia un templado verano. Durante la estación estival la llanura del Ebro tiene temperaturas medias superiores a 18ºC, y en julio y agosto alcanza los 21ºC-22ºC, con apreciables variaciones espaciales Oeste-Este, como ponen en evidencia los observatorios de Haro y Alfaro en un extremo y otro de la región (Figura 8). Hacia el Sur se hace patente la acción de la altitud y las temperaturas veraniegas en las zonas altas de las sierras no superan los 12ºC. Pasados los meses de julio y agosto las temperaturas disminuyen en septiembre entre 2ºC y 3ºC, y conforme avanza octubre descienden de modo tan rápido como había sido su ascenso en primavera, dando entrada a una estación otoñal que sitúa a buena parte del territorio con valores moderados entre los 8ºC y 12ºC.

Aunque la región no soporta acusados excesos térmicos, los promedios de las temperaturas máximas y mínimas nos acercan a una realidad que no está exenta de contrastes (Figuras 6 y 7). La distribución de la temperatura media de las mínimas anuales muestra la moderación térmica de la región, pues en buena parte de la misma las cifras son superiores a los 5ºC, y sólo en la montaña descienden por debajo de 2ºC. No obstante, en invierno las mínimas son con frecuencia negativas y, como muestra la cartografía trazada, tienen promedios inferiores a 0ºC en las principales sierras, lo que da idea del rigor del frío que en algunos momentos soporta la región. Es en la franja ribereña del Ebro y, sobre todo, en La Rioja Baja donde las mínimas son muy suaves.

Los valores de las temperaturas máximas refuerzan también la consideración de clima templado de La Rioja. No soporta la región temperaturas excesivamente altas, salvo en el extremo oriental, donde se superan los 18ºC de media anual; en el resto las cifras son más suaves, con la gradual transición hacia las áreas de montaña. Como es lógico las máximas se alcanzan en verano. Durante esta estación la media de las máximas es superior a 20ºC en la mayor parte del territorio, pero no llega a soportar el sofocante calor estival de las tierras centrales de la Depresión del Ebro, aunque excepcionalmente las máximas absolutas han superado los 35ºC en situaciones de olas de calor que en ocasiones afectan a La Rioja.

Este régimen térmico indica que el contraste entre el verano y el invierno es importante. La amplitud media del ciclo térmico entre ambos momentos del año es de 15ºC a 19ºC, y llega a valores muy elevados, en torno a 40ºC, si se analizan las diferencias entre las temperaturas extremas de verano e invierno. En el conjunto del territorio se comprueba que la amplitud es baja en las tierras occidentales (caso de Haro) y que aumenta

hacia el Este, donde el grado de continentalidad es mayor (Alfaro). La distinta amplitud parece deberse sobre todo a la desigualdad de los veranos, pues los valores térmicos de julio y agosto se incrementan de manera muy perceptible desde La Rioja Alta a La Rioja Baja, mientras las medias de enero son espacialmente bastante más uniformes.

2.3. Evapotranspiración

La modelización de la distribución espacial de la evapotranspiración (ETP) muestra la estrecha relación de la misma con la temperatura y pone en evidencia los contrastes entre las áreas de montaña del Sur y la zona llana junto al Ebro. En las altas sierras meridionales la ETP es inferior a 800 mm, pero aumenta progresivamente hacia la llanura septentrional donde alcanza los 1000 mm y los supera ampliamente en su extremo oriental (Figura 9).

En el transcurso del año la ETP es muy baja en invierno y alcanza valores muy altos en verano, mientras en los periodos equinocciales la tónica general muestra cantidades superiores en primavera frente al otoño. En los meses invernales la ETP no sólo es baja, sino que además es bastante uniforme: en buena parte de la región los valores oscilan entre 50 y 100 mm, con escasas diferencias entre montaña y llano, y muy probablemente en las altas tierras de las sierras de la Demanda, Urbión y Cebollera no alcancen los 50 mm. En el extremo contrario se sitúan los meses de junio, julio y agosto: en este momento la ETP es máxima, superior a los 300 mm en la montaña, llegando a alcanzar promedios para la estación estival de 500 y 550 mm en amplias zonas de la ribera del Ebro. En primavera y otoño las cifras oscilan con más frecuencia entre 150 y 300 mm y de nuevo dibujan con nitidez los contrates entre montaña y llano.

2.4. Balance hídrico

El excedente o déficit de agua en La Rioja es fiel reflejo del comportamiento temporal y de la distribución espacial de los elementos climáticos antes descritos; fruto de ello es el balance hídrico anual claramente deficitario existente en buena parte de la región. Tan sólo en la sierra de la Demanda y en menor medida en las sierras de Urbión y Cebollera hay excedente; en las tierras altas de Cameros y Sierras Orientales, a pesar de su altitud, el excedente de agua es prácticamente nulo; en el resto del territorio el balance es negativo o muy negativo, con valores de -500 mm en la llanura septentrional y -700 mm en La Rioja Baja, que se prolongan hacia las sierras orientales a través de los valles elaborados por la red fluvial (Figura 10).

El déficit más acentuado se da en verano, en relación con unas bajas precipitaciones y unas temperaturas elevadas, pero también este hecho tiene marcados contrastes espaciales: en las áreas de mayor altitud el déficit parece inexistente porque a la moderación térmica se suma la abundancia de lluvias; aquí, desde octubre a junio existe un claro superávit de agua que se evacua al exterior o queda retenida en la capa de nieve hasta la primavera y principios de verano. Aun en los meses de máximo calor en los que la ETP supera a la precipitación (caso del observatorio de Posadas, de

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

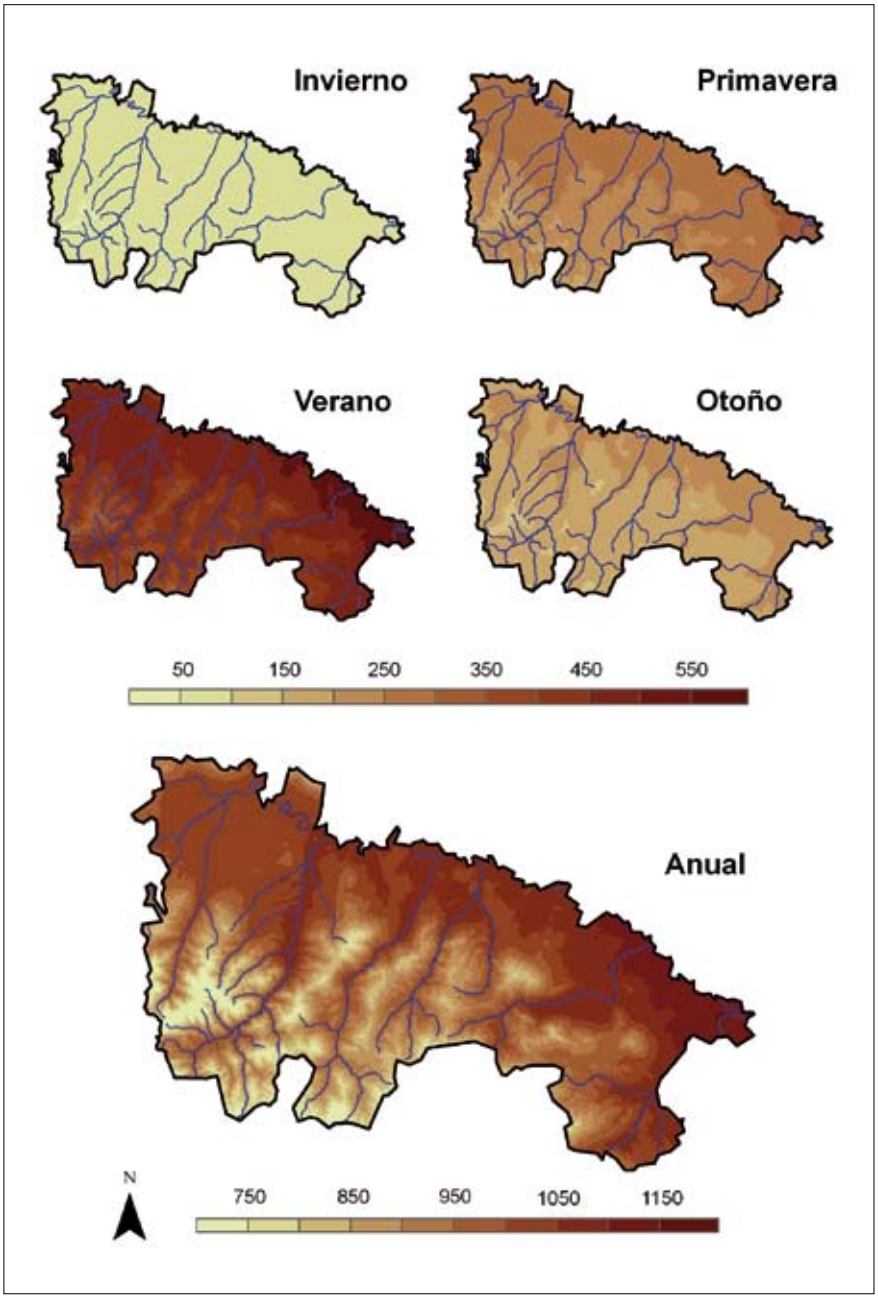

Figura 9. Distribución espacial de los valores de evapotranspiración potencial estacional y anual en La Rioja (datos en mm.).

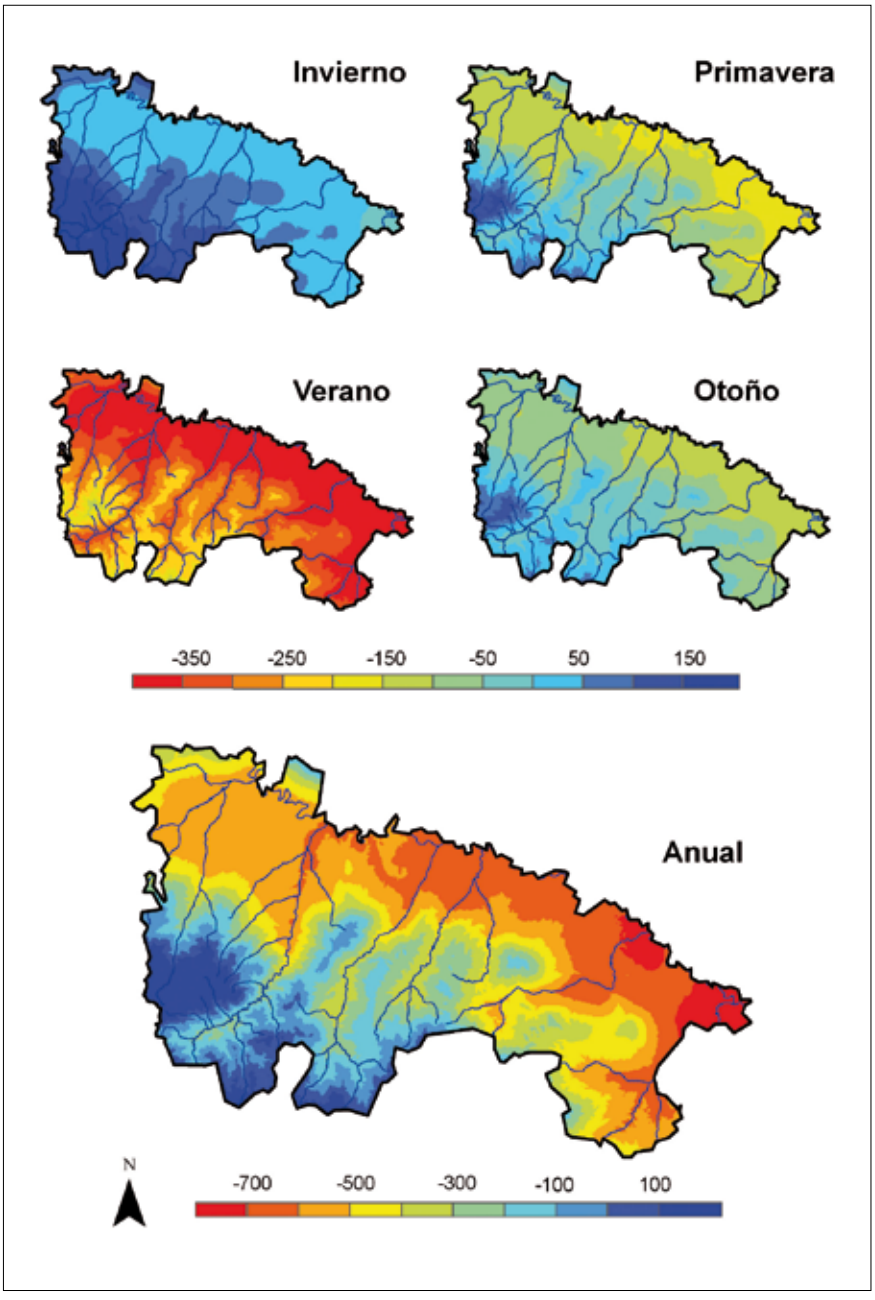

Figura 10. Distribución espacial de los valores de balance hídrico estacional y anual en La Rioja (datos en mm.).

Zubía Monográfico | *núm. 20 (2008), pp. 119-142*
ISSN 1131-5423

la Figura 11), no existe carencia porque el agua almacenada en el suelo es utilizada para la evaporación y la transpiración. Con las lluvias de otoño e invierno el suelo alcanza de nuevo la saturación y hasta la primavera prevalece el excedente hídrico. Esta situación es mucho más evidente en invierno porque el balance positivo es casi general en la región, con cantidades que en muchas áreas superan los 100 mm. En primavera se genera de nuevo un excedente hídrico, que se manifiesta de forma progresiva con la altitud: en las zonas más húmedas de las altas sierras ibéricas, y en particular en las superficies mejor expuestas de la Demanda, hay un importante excedente de agua, superior a 100 mm; con la pérdida de altitud el agua sobrante se reduce rápidamente, de modo que el piedemonte es cada vez más seco; en las tierras llanas, ya junto al Ebro, el déficit alcanza los 100 mm en La Rioja Alta y supera los 150 m en La Rioja Baja.

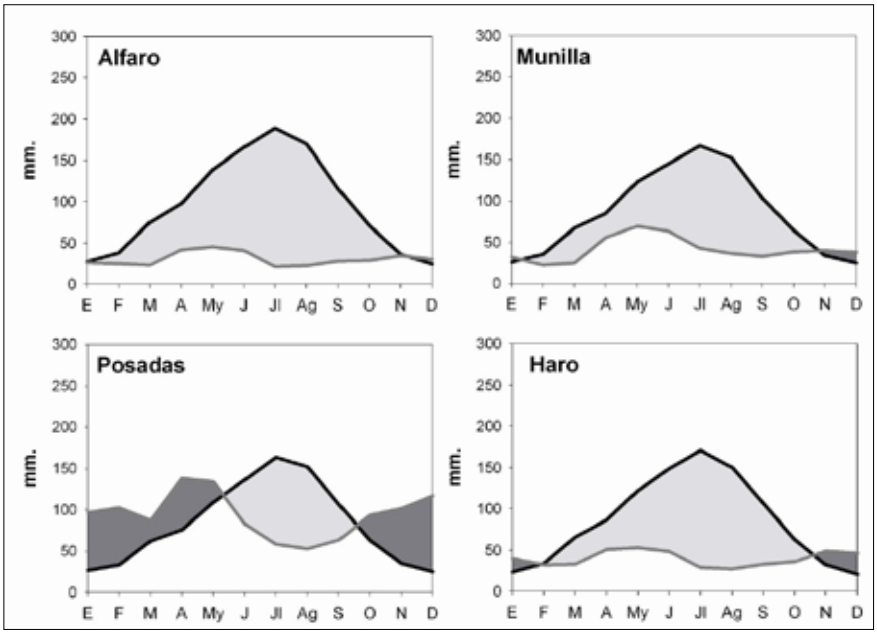

Figura 11. Valores medios mensuales de precipitación (línea gris) y evapotranspiración potencial (línea negra) y balance hídrico mensual (positivo: gris oscuro, negativo: gris claro) en cuatro observatorios representativos de diferentes ámbitos geográficos de La Rioja.

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han señalado con cierto detalle las características generales del clima de La Rioja, a partir de la creación de cartografías digitales basadas en técnicas avanzadas de regresión espacial y sistemas de información geográfica. La disponibilidad de cartografías de calidad es básica para la gestión agrícola e hidrológica, especialmente en la región mediterránea, donde el agua es un recurso de vital importancia. Las cartografías desarrolladas permiten obtener información en cualquier punto del espacio, independientemente de la existencia, o no, de estaciones meteorológicas.

La utilidad de este tipo de cartografías es muy evidente, por lo que desde hace décadas los profesionales de la investigación climatológica tratan de elaborarlas. En el caso de La Rioja, los primeros resultados se deben a J. L. Calvo Palacios que, con gran esfuerzo y escasos medios, informatizó los datos disponibles de los observatorios riojanos y otros próximos para analizar las variables precipitación y temperatura, y cartografiar isoyetas e isotermas, así como las isolíneas de evapotranspiración y de balance hídrico (Calvo Palacios, 1977). Ya en los años noventa, tres estudios (Núñez y Martínez Abaigar, 1991; Martínez Abaigar *et al.,* 1994; Cuadrat, 1994) vuelven a cartografiar la distribución espacial de variables climáticas con metodologías más avanzadas.

Tanto en los trabajos anteriores como en este estudio se muestra claramente que La Rioja constituye una zona de transición entre la franja lluviosa y verde del País Vasco – Cantabria y el sector semiárido del Centro de la Depresión del Ebro; transición, por otro lado, estudiada con mucho detalle por Ruiz Urrestarazu (1982). A grandes rasgos es evidente que el sector occidental de La Rioja, más expuesto a la humedad del océano Atlántico y a su efecto termorregulador, presenta un clima más lluvioso y templado. Conforme se avanza hacia el Este, la mayor sequedad de la atmósfera y los contrastes de sus temperaturas nos introducen gradualmente en los caracteres continentales propios del centro de la Depresión del Ebro. Sobre estas condiciones globales la montaña ejerce su efecto modificador, aumentando las precipitaciones, disminuyendo las temperaturas y sus amplitudes, en marcadas gradaciones de la montaña al llano que reproducen la rápida transición topográfica del Sistema Ibérico al centro del Ebro. Estas diferentes influencias se entrecruzan en La Rioja, de Norte a Sur y de poniente a levante, dando origen a la notable variedad de condiciones climáticas que queda reflejada en la cartografía realizada.

Los resultados de este estudio confirman la utilidad de las técnicas de regresión espacial para la obtención de diferentes variables climáticas distribuidas en el espacio ya que el método permite tener en cuenta los efectos las variables geográficas y topográficas, y tener en cuenta buena parte de la variabilidad climática que no se podría considerar si únicamente se dispusiera de la información climática recogida en las estaciones meteorológicas. (Agnew y Palutikof 2000, Ninyerola *et al.* 2000, Daly *et al.* 2002; Vicente-Serrano *et al.* 2003). Los errores obtenidos en La Rioja son bajos en comparación con el rango total de las variables modelizadas. Incluso en el caso de las temperaturas mínimas se obtuvieron cartografías adecuadas, a pesar de que la modelización de esta variable suele ser compleja como consecuencia de las inversiones térmicas (Daly *et al.* 2002).

La utilidad de las cartografías térmicas y pluviométricas también se ha puesto de manifiesto en el cálculo de variables derivadas, como es el caso de la evapotranspiración y el balance hídrico. Operaciones de álgebra de capas en entorno SIG permiten obtener derivados de forma sencilla, sin tener que recurrir a la estimación local de las variables y a la nueva inter-

polación de las mismas, e incluso de forma más precisa (Vicente-Serrano *et al.*, 2007).

En resumen, las cartografías aquí presentadas suponen un avance, en cuanto a precisión espacial y objetividad, frente a las cartografías climáticas tradicionales, permitiendo una adecuada caracterización espacio-temporal del clima en La Rioja, tal como se ha presentado a escala estacional y anual en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de los siguientes proyectos de investigación: CGL2005-04508/BOS (financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia), PIP176/2005 (financiado por el Gobierno de Aragón), y "Programa de grupos de investigación consolidados" (BOA 48 of 20-04-2005), también financiado por el Gobierno de Aragón. Agradecer al Instituto Nacional de Meteorología la cesión de los datos utilizados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Agnew, M.D. y Palutikof, J.P. (2000). GIS-based construction of base line climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*. 14: 115-127.

Beguería, S. y Vicente-Serrano, S.M. (2006). Mapping the hazard of extreme rainfall by peaks-over-threshold extreme value analysis and spatial regression techniques. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* 45: 108–124.

Blennow, K. y Persson, P. (1998). Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and Forest Meteorology,* 89: 59-71.

Brown D.P. y Comrie, A.C. (2002). Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. *Climate Research* 22: 115-128.

Burrough, P.A. y McDonnell, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems.* Oxford University Press, Oxford.

Calvo Palacios, J.L. (1977). *Los Cameros. De región homogénea a espacio – plan*. Instituto de Estudios Riojanos, 2 vols., Logroño.

Cuadrat, J.M. (1994). El clima de la Rioja. En: García Ruiz, J.M. y Arnáez Vadillo, J. (Eds). *Geografía de La Rioja*. Fundación Caja Rioja. Logroño.

Daly, C., Gibson, W.P., Taylor, G.H., Johnson, G.L. y Pasteris, P. (2002). A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research,* 22: 99-113.

Daly, C., Neilson, R.P. y Phillips, D.L. (1994). A statistical-topographical model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Climate and Applied Meteorology,* 33: 140-158.

Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology,* 228: 113-129.

Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C. (1998). *Multivariate data analysis*. Prentice Hall International, Inc. 799 pp.

Hargreaves, G.L. (1985). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 120: 1132-1139.

Hutchinson, M.F. (1995). Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems,* 9: 385-403.

López-Moreno, J.I. y Nogués-Bravo, D. (2005). A generalized additive model for modelling the spatial distribution of snowpack in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes,* 19: 3167-3176.

López-Moreno, J.I.; Vicente-Serrano, S.M. y Lanjeri, S. (2007) Mapping the snowpack distribution over large areas using GIS and interpolation techniques. *Climate Research,* 33: 257-270.

Martínez Abaigar, J., Núñez, E. y Tomás Las Heras, R. (1994). *Agroclimatología de La Rioja*. Instituto de Estudios Riojanos: 155 pp., Logroño.

Mitasova, H., and Mitas, L. (1993). Interpolation by Regularized Spline with Tension. *Mathematical Geology,* 25: 641-655.

Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J.M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology,* 20: 1823-1841.

Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J.M. (2007). Objective air temperature mapping for the Iberian Peninsula using spatial interpolation and GIS. *International Journal of Climatology*, 27: 1231-1242.

Núñez, E. y Martínez Abaigar, J. (1991). *El clima de La Rioja. Análisis de precipitaciones y temperaturas.* Gobierno de La Rioja. Logroño.

Pardo-Igúzquiza, E. (1998). Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology,* 18: 1031-1047.

Perry, M. y Hollis, D. (2005). The development of a new set of long-term climate averages for the UK. *International Journal of Climatology*, 25: 1023-1039.

Pons, X. (1996). Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Juaristi, J. i Moro, I. (eds.) Vitoria-Gasteiz. 87-97 p.

Pons, X. (2007). *Manual of Miramon. Geographic Information System and Remote Sensing Software*. (http://www.creaf.uab.es/miramon). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF): Bellaterra.

Ruiz Urrestarazu, E. (1982). *La transición climática del cantábrico oriental al valle medio del Ebro*. Diputación Foral de Alava: 651 pp., Vitoria.

Sánchez Gabriel, M. (1989). *Climatología y bioclimatología aplicadas a La Rioja*. Instituto de Estudios Riojanos. Logroño.

Vicente Serrano, S.M., Saz, M.A. y Cuadrat, J.M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research,* 24: 161-180.

Vicente-Serrano, S.M., Lanjeri, S. y López-Moreno, J.I. (2007). Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques. *International Journal of Climatology*, 27: 1103-118.