

LA PRECIPITACIÓN EN EL PIRINEO ESPAÑOL: DIVERSIDAD ESPACIAL EN LAS TENDENCIAS Y ESCENARIOS FUTUROS

S. M. VICENTE-SERRANO¹, J. I. LÓPEZ-MORENO¹
& S. BEGUERÍA²

*1 Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei,
Apdo. 202, 50080 Zaragoza, c.e.: svicen@ipe.csic.es*

*2 Estación Experimental de Aula Dei, CSIC, Campus de Aula Dei,
Apdo. 202, 50080 Zaragoza*

ABSTRACT.– *This paper analyses the spatial and temporal precipitation patterns in the Spanish Pyrenees since 1950. A multi-parametric approach is used by means of the analysis of total precipitation amount but also considering other important parameters such as the number of rainy days, the duration of the dry spells and the extreme precipitation events. Results show a general decrease of precipitation in second half of the twentieth century mainly in spring and summer. The precipitation decrease is mainly explained by the reduction in the frequency of the most intense precipitation events. Trend in rainy days has a great spatial and seasonal variability. The climate change models show in the Spanish Pyrenees a general decrease of precipitation amounts throughout the twentieth-one century, also showing a decrease in the frequency of days rainy, an increase of the intensity of the most extreme events and a noticeable increase in the duration of the dry spells.*

Key words: Precipitation, climate change models, recent trends, dry spells, Spanish Pyrenees.

RÉSUMÉ.– *Ce travail analyse les patrons spatiaux et temporels des précipitations dans les Pyrénées Espagnoles depuis l'année 1950 avec une perspective multi paramétrique, considérant non seulement le volume total de précipitation mais aussi différents paramètres qui donnent une importante information, comme le nombre de jours de précipitation, les sécheresses et les précipitations extrêmes. Les résultats montrent une diminution généralisée des précipitations tout au long de la seconde moitié du vingtième siècle, surtout pendant le printemps et l'été. Cette évolution est fondamentalement expliquée par la diminution des événements d'une plus grande intensité. La tendance dans la fréquence de jours pluvieux a une grande variabilité*

spatiale. Les modèles de changement climatique montrent une accusée diminution des précipitations tout au long du vingtième siècle et un dans ce qui est Pyrénéen, avec une diminution dans la fréquence des jours pluvieux, une augmentation de l'intensité des phénomènes les plus extrêmes et une accusée augmentation dans la durée des sécheresses.

Mots clés: Précipitation, modèles de changement climatique, tendencias recientes, sequeresses, Pirinéas Españols.

RESUMEN.— En este trabajo se analizan los patrones espacio-temporales de las precipitaciones en el Pirineo español desde el año 1950 desde una perspectiva multi-paramétrica, considerando no solo el volumen total de precipitación sino también diferentes parámetros que dan una importante información sobre la ocurrencia de las mismas, como el número de días de precipitación, las rachas secas y las precipitaciones extremas. Los resultados muestran un descenso generalizado de las precipitaciones a lo largo de la segunda mitad del siglo veinte, sobre todo durante la primavera y el verano. El descenso se explica fundamentalmente por la disminución de los eventos de mayor intensidad pues la tendencia en la frecuencia de días lluviosos tiene una gran variabilidad espacial. Los modelos de cambio climático muestran en sus predicciones un acusado descenso de las precipitaciones a lo largo del siglo veintiuno en el Pirineo, con un descenso en la frecuencia de días lluvioso, un aumento de la intensidad de los fenómenos más extremos y un acusado aumento en la duración de las rachas secas.

Palabras clave: Precipitación, modelos de cambio climático, tendencias recientes, rachas secas, Pirineo español.

1. Introducción

Los actuales modelos de cambio climático predicen importantes modificaciones en las condiciones climáticas futuras, especialmente en las regiones de montaña (NOGUÉS *et al.*, 2007). Además, diferentes modelos muestran que a escala global es la cuenca mediterránea donde la predicción de los modelos de cambio climático muestra un mayor descenso pluviométrico a finales del siglo veintiuno (HOUGHTON *et al.*, 2001). Este hecho plantea indudables incertidumbres sobre la disponibilidad de recursos hídricos en un futuro pues en la región mediterránea la principal fuente de recursos hídricos la constituyen las montañas, y un importante porcentaje de los caudales de los ríos, superior en ocasiones al 80%, se genera en las regiones de montaña (VIVIROLI & WEINGARTNER, 2004).

El Pirineo español constituye una de las principales fuentes de recursos hídricos de la Península Ibérica (GARCÍA-RUIZ *et al.*, 1985), por lo que las precipitaciones que registra esta cadena montañosa trascienden en importan-

cia a su área geográfica, dependiendo los abastecimientos de la mayor parte de la cuenca del Ebro, tanto de regadío como urbanos, de los recursos hídricos generados en la región Pirenaica. Por esta razón, resulta de gran importancia conocer los patrones espaciales de cambio pluviométrico que se registran en la región, ya que la precipitación es el principal factor que explica la distribución espacio-temporal de los caudales (GARCÍA-RUIZ *et al.*, 2001; LÓPEZ-MORENO, 2006).

El estudio de la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones en el Pirineo no es una tarea sencilla, ya que la variabilidad espacial resulta muy importante como consecuencia del relieve (LÓPEZ-MORENO, 2006) y de la influencia de diferentes masas atmosféricas (CREUS, 1983; ESTEBAN *et al.*, 2004). El impacto de diferentes patrones de circulación atmosférica a diferentes escalas espaciales, como la Oscilación del Atlántico Norte, o de determinadas configuraciones sinópticas muestra contrastes claros (VICENTE-SERRANO & LÓPEZ-MORENO, 2006). Este hecho puede producir que cambios en dichos patrones de circulación tengan notables impactos sobre las precipitaciones de un determinado sector, mientras que en otras áreas no se registren modificaciones.

En este trabajo se analizan las tendencias pluviométricas en el Pirineo aragonés desde el año 1950. Adoptando una perspectiva multiparamétrica, no solamente se han considerado los cambios en el volumen de las precipitaciones, sino también en una serie de parámetros relacionados con la frecuencia e intensidad de las mismas, que tienen una gran importancia en cuanto a su reparto y posible utilización. Además, se introducen las predicciones desarrolladas por un modelo de cambio climático para finales del siglo XXI, evaluando no sólo el cambio esperado en los volúmenes de precipitación, sino su reparto estacional y el cambio predicho para los mismos parámetros de frecuencia e intensidad.

2. Metodología

2.1. Base de datos

Se han utilizado 35 series diarias completas y homogéneas entre los años 1950 y 2002. La distribución espacial de las mismas se muestra en la Figura 1, en la que se definen los límites del área de estudio. Ésta se ha delimitado a partir de la clasificación de áreas de montaña de la UNESCO, que agrupa criterios de elevación y pendiente. Las series pluviométricas fueron sometidas a un meticuloso proceso de reconstrucción, control de calidad y test de homogeneidad que permiten minimizar la presencia de errores en la base de datos

y garantizar su consistencia. Detalles sobre el proceso de aplicado a la base de datos pueden consultarse en BEGUERÍA *et al.* (2007).

A partir de la base de datos se obtuvieron una serie de parámetros generales a nivel estacional y anual. Las estaciones se definieron de acuerdo a los criterios estándar utilizados en los análisis climáticos: invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril, mayo), verano (junio, julio, agosto) y otoño (septiembre, octubre y noviembre). Los parámetros obtenidos fueron: i) el volumen total de precipitación, ii) el número de días con precipitación, iii) el número de días con una precipitación superior al 95º percentil del total de la serie, iv) el volumen de precipitación máximo diario, v) el promedio de duración de las rachas secas (secuencias de días sin precipitación), y vi) la duración máxima de las rachas secas. A partir de estos parámetros se realizaron diferentes análisis de tendencias en el periodo 1950-2002 a escala estacional y anual.

El análisis de tendencias se aplicó de forma individual a las series de cada una de las 35 estaciones analizadas. Sin embargo, también se aplicó para el conjunto pirenaico a una serie regional obtenida mediante el promedio ponderado de los diferentes observatorios. De acuerdo con el método planteado por JONES & HULME (1996), en que el factor de ponderación es la superficie representada por cada observatorio, de acuerdo a un método de polígonos de Thiessen.

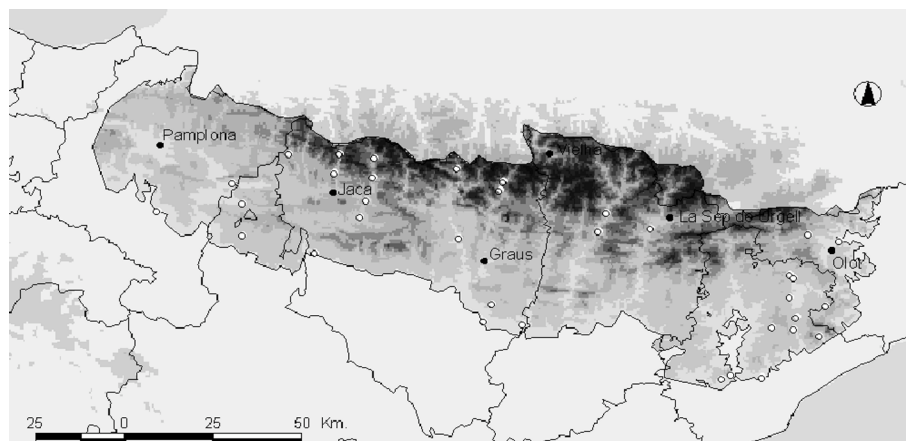


Figura 1. Área de estudio y distribución de los observatorios meteorológicos utilizados (puntos blancos).

Figure 1. Study area and spatial distribution of the weather stations used (white points).

2.2. *Análisis de tendencias*

Las tendencias de los diferentes parámetros se analizaron por medio del test no paramétrico, basado en rangos, Rho de Spearman ya que presenta una mayor robustez frente a tests de carácter paramétrico, al estar menos afectado por la presencia de valores extremos o por la posible no normalidad de las series (LANZANTE, 1996). Para el análisis temporal es frecuente la aplicación de un suavizado previo de los datos (SNEYERS, 1992), ya que este procedimiento permite filtrar las variaciones interanuales y desvelar, en mayor medida, las tendencias más persistentes (WHEELER & MARTÍN-VIDE, 1992; SALINGER *et al.*, 1995; DE LUIS *et al.*, 2000). Por esta razón, y previamente al análisis de tendencias de las diferentes variables, las series estacionales y anuales fueron filtradas mediante un procedimiento de media móvil mediante una ventana de 9 años, en línea con DE LUIS *et al.* (2000) y VICENTE-SERRANO & LÓPEZ-MORENO (2006). El procedimiento de filtrado reduce los grados de libertad en los análisis porque reduce la muestra (de 52 a 46), pero también reduce la variabilidad de alta frecuencia que podría ocultar la existencia de posibles tendencias. Para considerar las tendencias significativas se consideró un umbral de $\alpha = 0.05$.

2.3. *Modelos de cambio climático*

La información sobre los cambios esperados en la precipitación a finales del siglo XXI se ha basado en la comparación de las predicciones realizadas para un periodo control (1961-1990) y un periodo futuro (2071-2100), bajo el escenario A2, por el modelo climático regional (RCM) RCAO desarrollado por el Instituto Meteorológico de Suecia (SMHI). Dicho modelo es conducido por el modelo global de circulación (GCM) HADCM3 del Hadley Center. El modelo RCAO, SMHI fue seleccionado para este estudio frente a otros RCMs disponibles (ver la base de datos del proyecto PRUDENCE <http://prudence.dmi.dk>) en base al buen ajuste entre los valores modelizados y los registrados en observatorios del Pirineo durante el periodo control. Los estimadores de error proporcionados por RCAO, SMHI fueron los más bajos cuando se compararon con los de otros cinco RCMs desarrollados para el continente Europeo (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2007). La resolución espacial del modelo es próxima a 50 kilómetros (0.44 °) y proporciona información a escala diaria. El escenario de emisiones de gases de efecto invernadero seleccionado para el periodo (2071-2100), A2, se caracteriza por el mantenimiento de elevados niveles de emisión durante las próximas décadas, y es comúnmente utilizado en trabajos que analizan el impacto del cambio climático sobre distintos parámetros climáticos.

3. Resultados

3.1. Tendencias en los totales pluviométricos

La Figura 2 muestra la evolución de los volúmenes estacionales y anuales de precipitación a partir de la serie regional de todo el Pirineo. Mientras en invierno y otoño no existen tendencias significativas, en primavera, verano y a escala anual existe una tendencia negativa y significativa hacia un descenso pluviométrico ($Rho = -0.61$, $Rho = -0.75$ y $Rho = -0.68$, en primavera, verano y anual, respectivamente).

Si se analizan espacialmente las tendencias, se comprueba la existencia de patrones generalizados en la mayoría de estaciones, con un descenso en primavera, verano y a escala anual en el conjunto del Pirineo (Figura 3). En

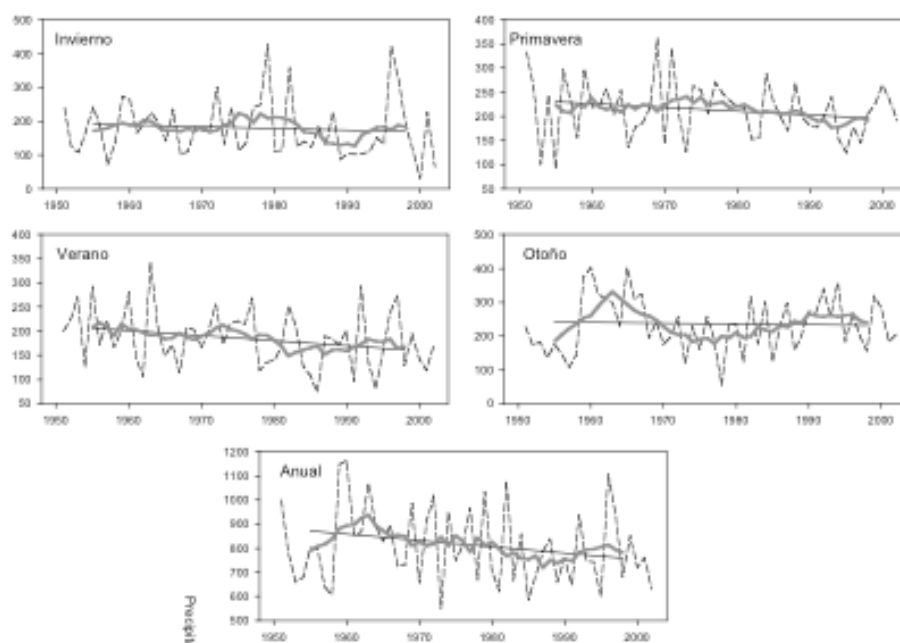


Figura 2. Evolución de los volúmenes estacionales y anuales de precipitación (1951-2001). Línea negra discontinua (precipitación observada), línea gris (precipitación filtrada con un filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.

Figure 2. Evolution of the seasonal and annual precipitation amount (1951-2001). Black line (observed precipitation), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

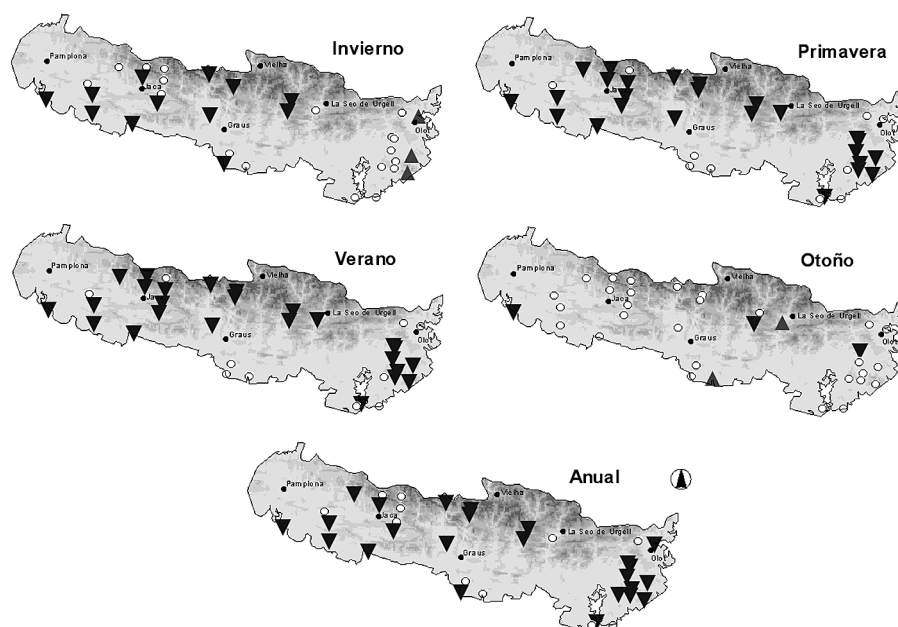


Figura 3. Distribución espacial de las tendencias en el volumen estacional y anual (1951-2002). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 3. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual precipitation amount (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend. Circles: non significant trend.

otoño son escasos los observatorios que muestran tendencias significativas, y en invierno se observa un marcado contraste espacial, con un descenso significativo en la mayor parte de los observatorios del Pirineo central, mientras que en la región oriental las tendencias no resultan significativas o incluso son positivas.

La evolución del número de días de precipitación a escalas estacional y anual no muestra tendencias significativas a partir de la serie regional del conjunto del Pirineo (Figura 4). No obstante, el resultado observado a partir de la serie regional enmascara importantes diferencias espaciales en la evolución del número de días de precipitación a lo largo del Pirineo (Figura 5). En todas las estaciones, y anualmente, los contrastes resultan muy importantes, incluso a nivel local. En invierno se produce una tendencia positiva dominante en las regiones más orientales, mientras que al norte de la región central se asiste a un descenso significativo en el número de días de precipita-

ción. En el resto de estaciones del año los patrones espaciales resultan menos claros, aunque al norte del Pirineo central en todas las estaciones del año se asiste a un descenso en el número de días de precipitación, que se traduce en una tendencia dominante hacia ese signo a escala anual.

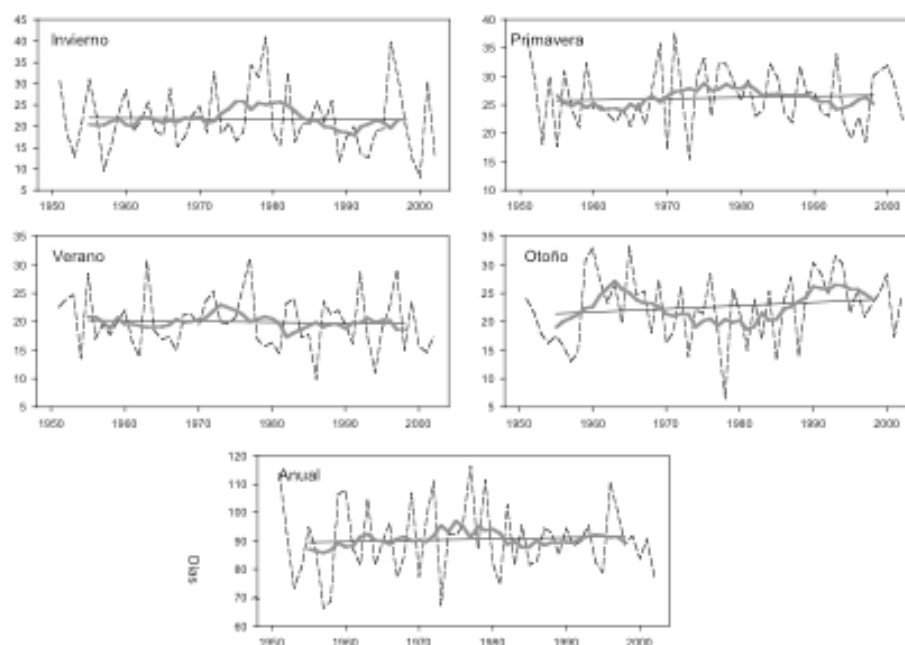


Figura 4. Evolución del número de días de precipitación estacional y anual (1951-2001). Línea negra discontinua (número de días observado), línea gris (filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.

Figure 4. Evolution of the seasonal and annual number of rainy days (1951-2001). Black line (observed number of days), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

El análisis de la evolución del número de días de precipitación con un volumen superior al 95º percentil muestra cambios importantes, para el conjunto pirenaico, durante la primavera y el verano, y también a escala anual, con descensos en el número de días por encima del 95º percentil de forma muy acusada ($Rho = 0.65$, $Rho = 0.81$ y $Rho = 0.79$, para la primavera, el verano y a escala anual, respectivamente) (Figura 6). A nivel espacial se aprecia claramente el descenso generalizado en primavera y a escala anual (Figura 7). En verano también predominan las tendencias descendentes en el número de

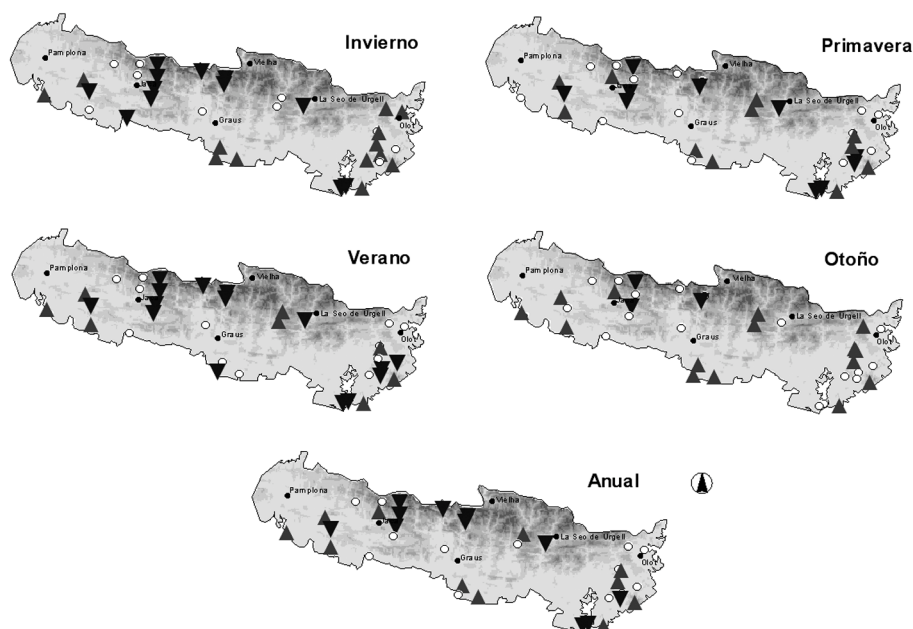


Figura 5. Distribución espacial de las tendencias en el número de días de precipitación estacional y anual (1951-2002). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 5. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual number of rainy days (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend. Circles: non significant trend.

días con una precipitación de mayor volumen, con la excepción de los observatorios localizados en el sector aragonés más occidental, en la cuenca alta del río Aragón. En invierno y otoño predominan los observatorios con tendencias no significativas que explican lo observado a partir de la serie regional. No obstante, existen también notables contrastes espaciales, con un predominio de observatorios con tendencia negativa en el Pirineo central y occidental.

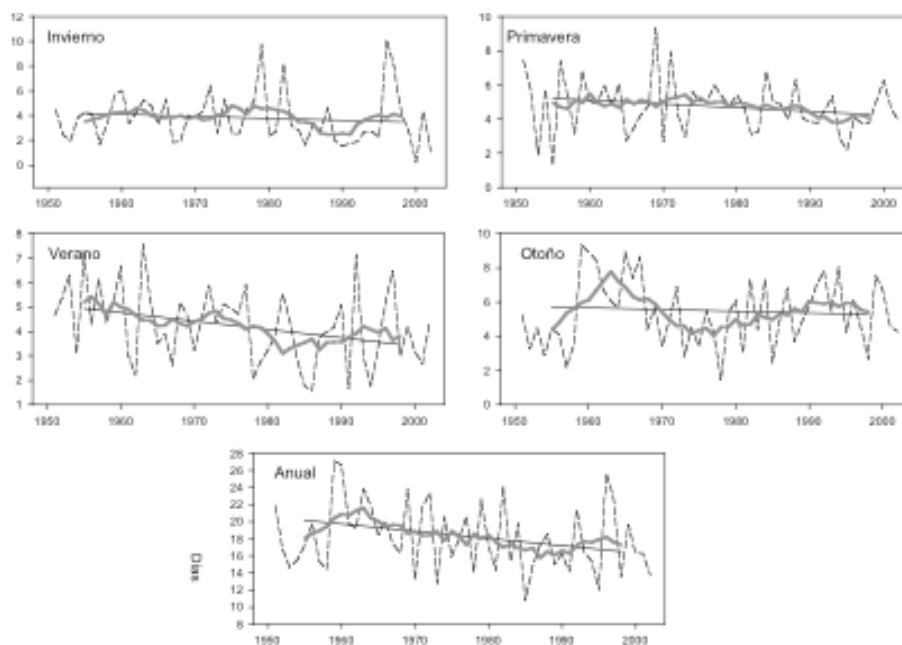


Figura 6. Evolución del número de días con un volumen de precipitación superior al 95 percentil estacional y anualmente (1951-2001). Línea negra discontinua (número de días observado), línea gris (filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.

Figure 6. Evolution of the seasonal and annual number of rainy days above 95 percentile (1951-2001). Black line (observed number of days), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

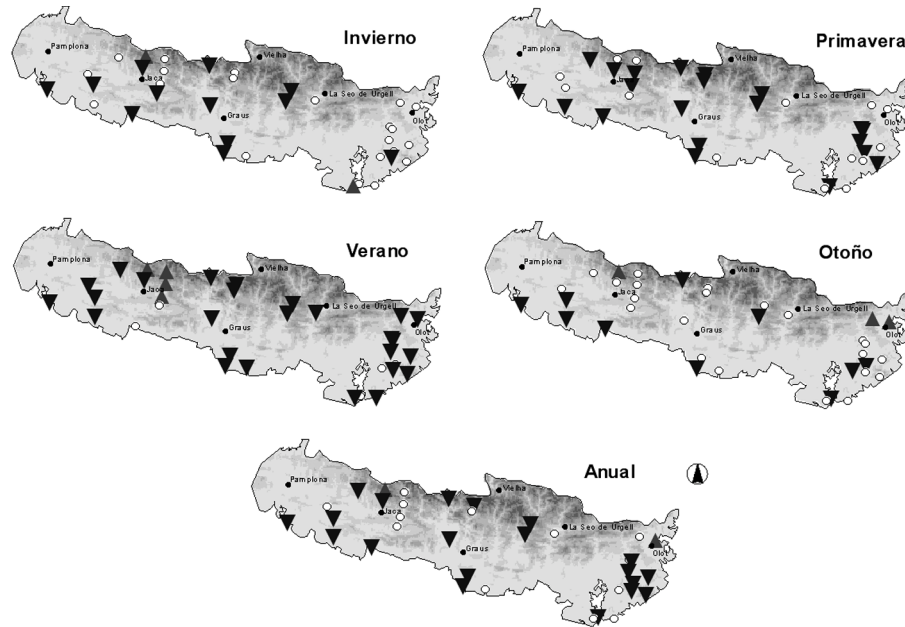


Figura 7. Distribución espacial de las tendencias en el número de días con un volumen de precipitación superior al 95 percentil estacional y anualmente (1951-2002). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 7. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual number of rainy days above 95 percentile (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend. Circles: non significant trend.

Respecto a los valores máximos de precipitación observados en un día, en primavera y verano se observan descensos significativos para el conjunto del Pirineo a partir de lo observado en la serie regional ($Rho = 0.61$ y $Rho = 0.43$, en primavera y verano, respectivamente) (Figura 8).

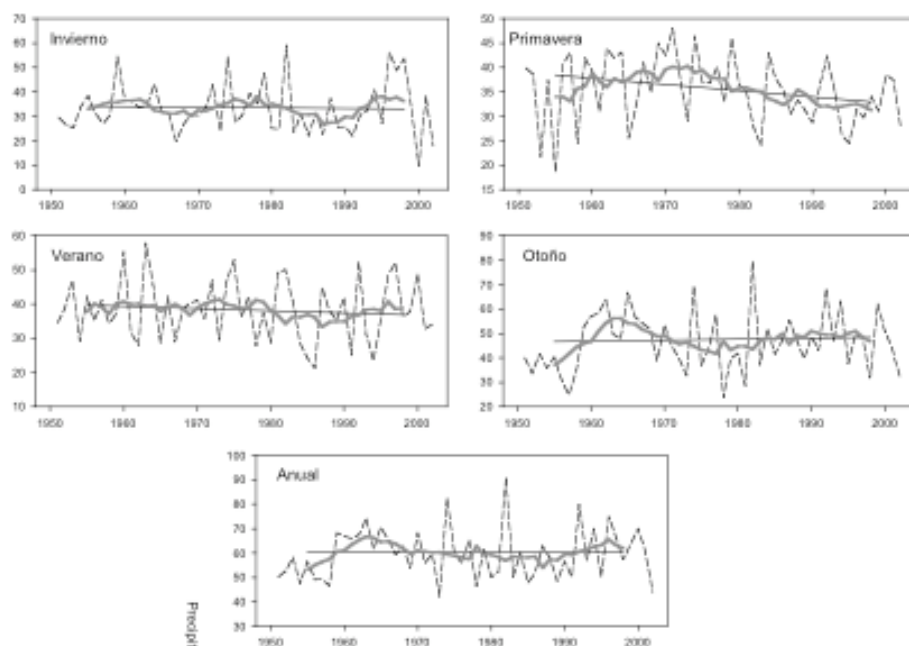


Figura 8. Evolución del valor máximo estacional y anual (1951-2001). Línea negra discontinua (precipitación observada), línea gris (filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.

Figure 8. Evolution of the seasonal and annual maximum precipitation (1951-2001). Black line (observed number of days), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

Espacialmente se observan importantes diferencias (Figura 9). En invierno se asiste a un incremento de los valores máximos en los observatorios más septentrionales del centro del Pirineo, en primavera y verano dominan las tendencias descendentes y en otoño la diversidad espacial es muy elevada. A escala anual, aunque predominan los observatorios con tendencias no significativas, sí que se observa un cierto gradiente espacial, en el que predominan las tendencias negativas en el sector más oriental y las tendencias positivas en el occidental, con un área de transición que correspondería con las áreas más orientales del Pirineo aragonés.

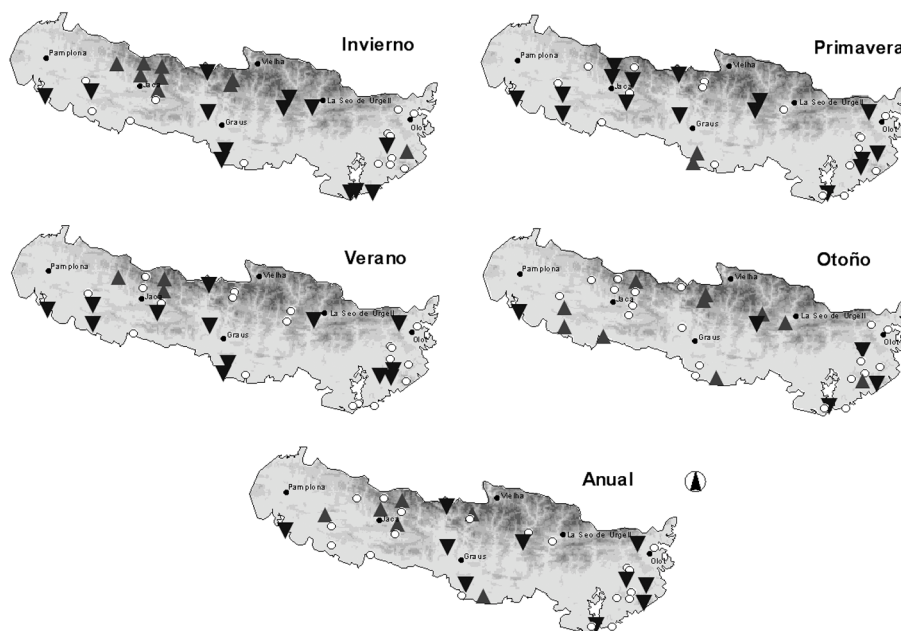


Figura 9. Distribución espacial de las tendencias en el volumen máximo diario estacional y anual (1951-2002). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 9. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual maximum precipitation (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend. Circles: non significant trend.

En el caso de las tendencias en la duración de las rachas secas, en invierno y anualmente se registra una tendencia positiva estadísticamente ($Rho = 0.43$ y $Rho = 0.46$, para el invierno y anualmente, respectivamente) (Figura 10). En cambio, en primavera la tendencia es positiva y no estadísticamente significativa ($Rho = 0.35$). No obstante, los cambios temporales no resultan muy pronunciados. De nuevo, espacialmente existen contrastes notables (Figura 11), aunque en el promedio anual hay un predominio hacia una superior duración de las rachas secas en la mayor parte de observatorios pirenaicos.

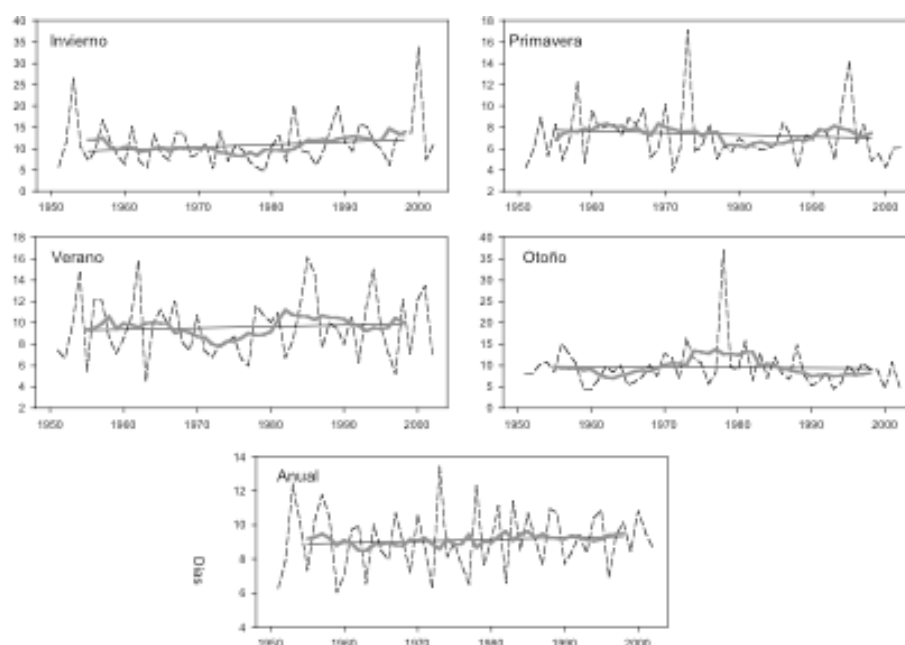


Figura 10. Evolución de la duración media de las rachas secas (1951-2001). Línea negra discontinua (promedio de duración de las rachas secas), línea gris (filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.
 Figure 10. Evolution of the seasonal and annual average duration of dry spells (1951-2001). Black line (observed number of days), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

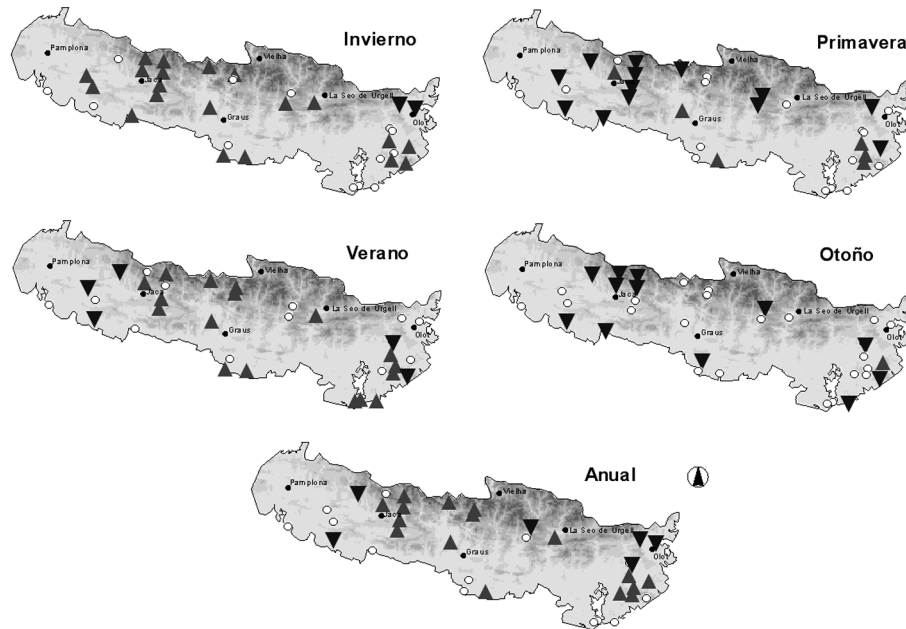


Figura 11. Distribución espacial de las tendencias en la duración media de las rachas secas (1951-2001). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 11. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual average duration of dry spells (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend. Circles: non significant trend.

Finalmente, en el caso de las rachas secas de mayor duración estacional y anual, la serie regional para el conjunto del Pirineo muestra una tendencia al aumento de la duración máxima en invierno y anualmente ($Rho = 0.5$ y $Rho = 0.6$), respectivamente (Figura 12). Especialmente existen contrastes estacionales muy claros, aunque en el conjunto anual predominan, claramente, las tendencias positivas que indican una mayor duración de las secuencias de días sin precipitación (Figura 13).

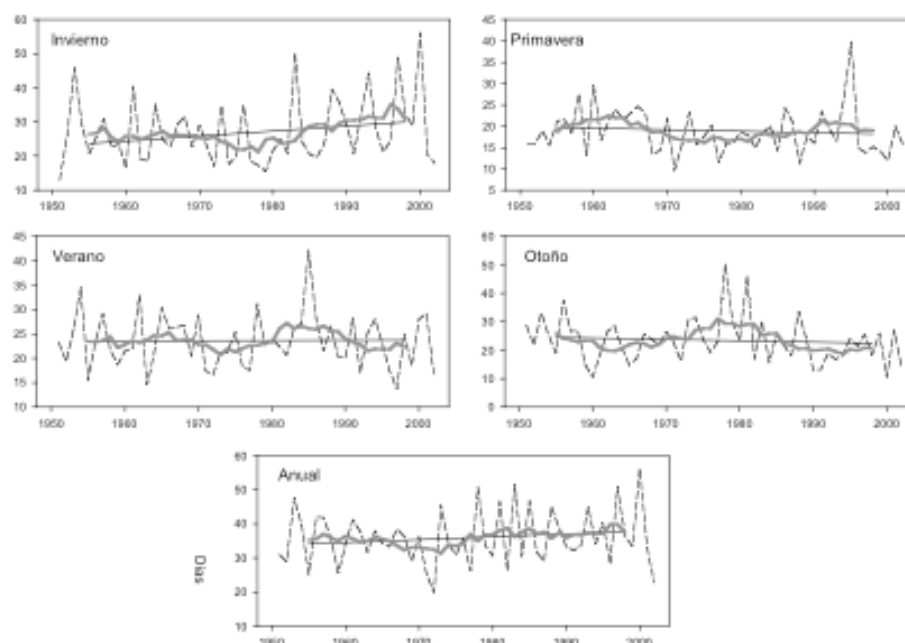


Figura 12. Evolución de la duración máxima de las rachas secas (1951-2001). Línea negra discontinua (promedio de duración de las rachas secas), línea gris (filtro de 9 años). La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.
 Figure 12. Evolution of the seasonal and annual duration of maximum dry spells (1951-2001). Black line (observed number of days), gray line (low pass filter of 9 years). The trend line has been obtained by means of regression analysis by means of filtered data.

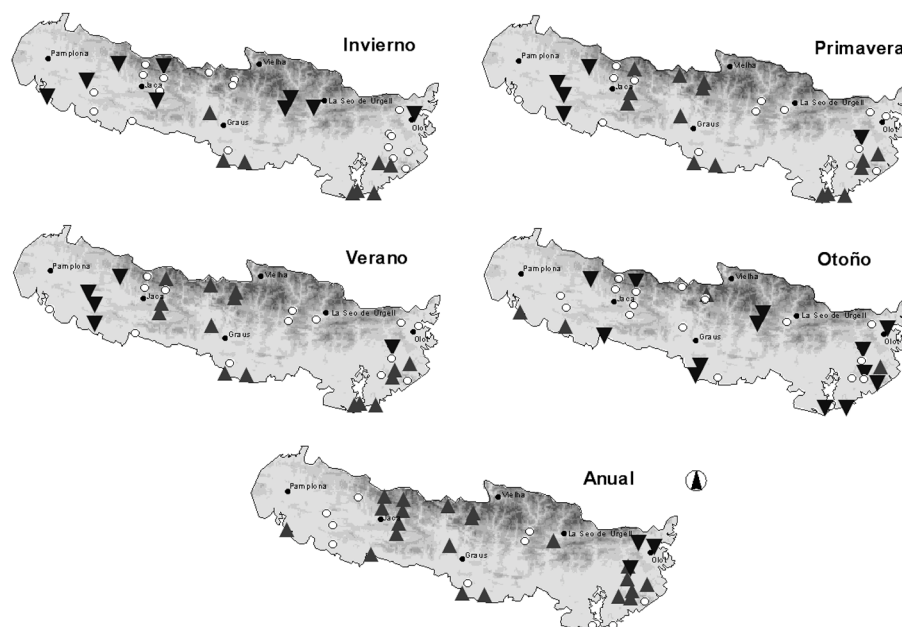


Figura 13. Distribución espacial de las tendencias en la duración máxima de las rachas secas (1951-2001). Triángulos: tendencia positiva y significativa. Triángulos invertidos: tendencia negativa y significativa. Círculos: Tendencia no significativa.

Figure 13. Spatial distribution of trends in the seasonal and annual duration of maximum dry spells (1951-2002). Triangles: positive and significant trend. Inverted triangles: negative and significant trend.

3.2. Predicciones para finales del siglo veintiuno

Una vez analizadas las tendencias recientes mediante los registros instrumentales, a continuación se muestran los valores medios de diferentes parámetros pluviométricos obtenidos a partir de los registros del modelo RCAO, SMHI para el periodo de control (1961-1990) y el escenario A2 (2071-2100) para el conjunto del área de estudio. La Figura 14 muestra el volumen estacional y anual de precipitación para ambos periodos. Hay que tener en cuenta que la resolución espacial de estos modelos no permite representar toda la diversidad climática que caracteriza el Pirineo español como consecuencia de sus importantes gradientes altitudinales. No obstante, los resultados permiten comprobar los patrones generales observados y la predicción esperada para un futuro. Se comprueba un descenso generalizado de las precipitaciones a finales del siglo XXI a escala anual, principalmente en las regiones más

septentrionales, donde se registran valores superiores a 1600 mm en el periodo de control. Los descensos oscilan en torno a 300 mm anuales en la mayor parte del área de estudio. No obstante, el descenso no resulta homogéneo para las diferentes estaciones del año, pues se produce principalmente en primavera y verano; sobre todo en esta última estación la predicción por parte del modelo muestra descensos de precipitación en torno al 50% con respecto al periodo de control.

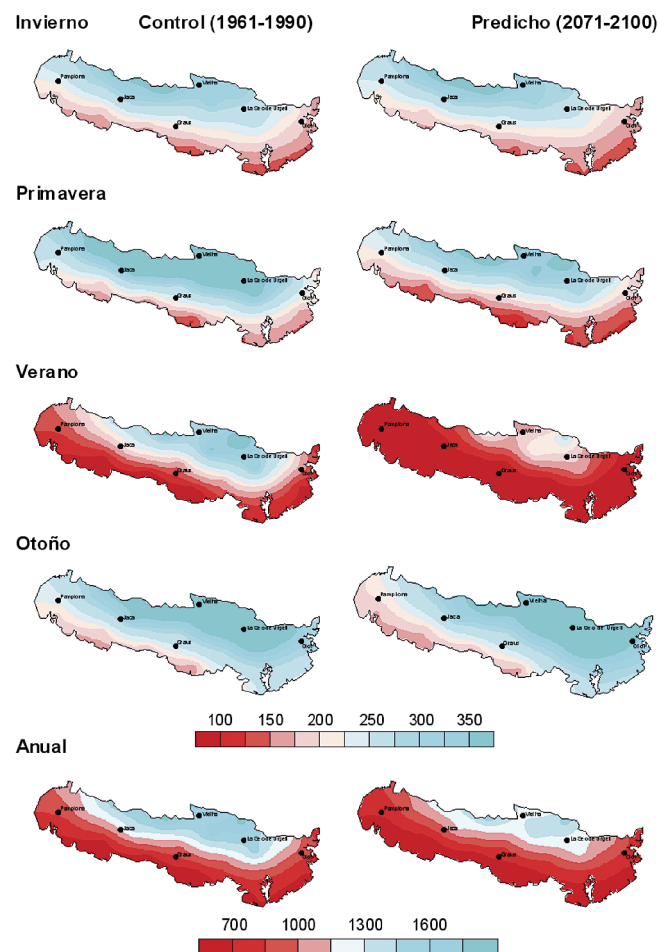


Figura 14: Distribución espacial del volumen de precipitación (mm.). Modelo RCAO, SMHI. Periodo de control (1961-1990) y escenario A2 (2071-2100).
 Figure 14. Spatial distribution of precipitation amount (mm.). Model RCAO, SMHI. Control period (1961-1990) and scenario A2 (2071-2100).

En el caso del número de días de precipitación, la Figura 15 muestra una tendencia hacia el descenso a finales del siglo XXI, sobre todo en las áreas más septentrionales. No obstante, al igual que en el descenso en el volumen de precipitación, el descenso que se registraría a escala anual quedaría explicado, fundamentalmente, por el descenso en la frecuencia de días de precipitación que se registraría en primavera y en verano.

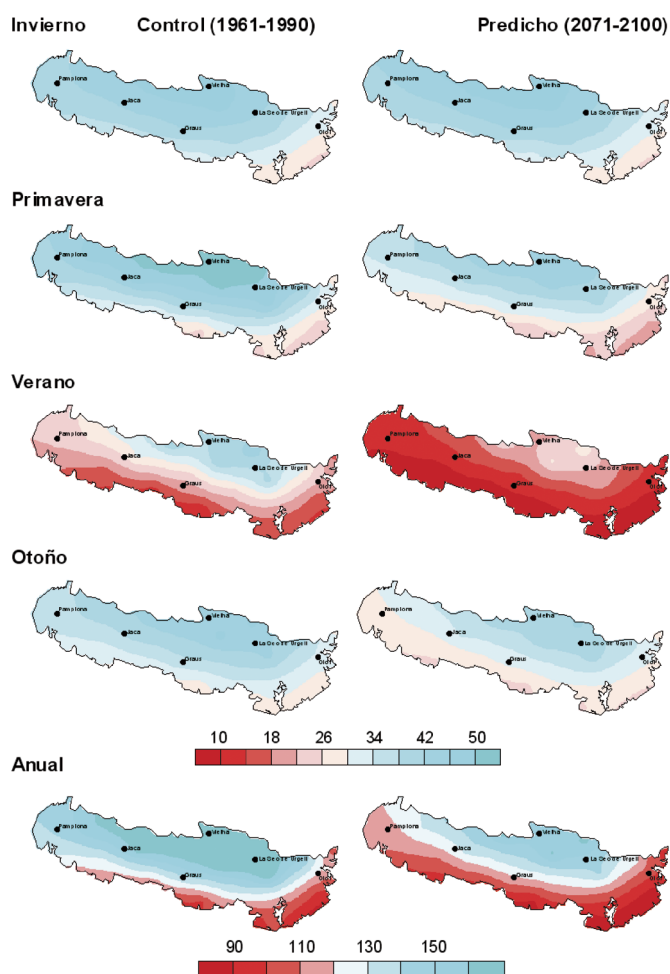


Figura 15: Distribución espacial del promedio de días de precipitación. Modelo RCAO, SMHI. Periodo de control (1961-1990) y escenario A2 (2071-2100).

Figure 15. Spatial distribution of average rainy days. Model RCAO, SMHI. Control period (1961-1990) and scenario A2 (2071-2100).

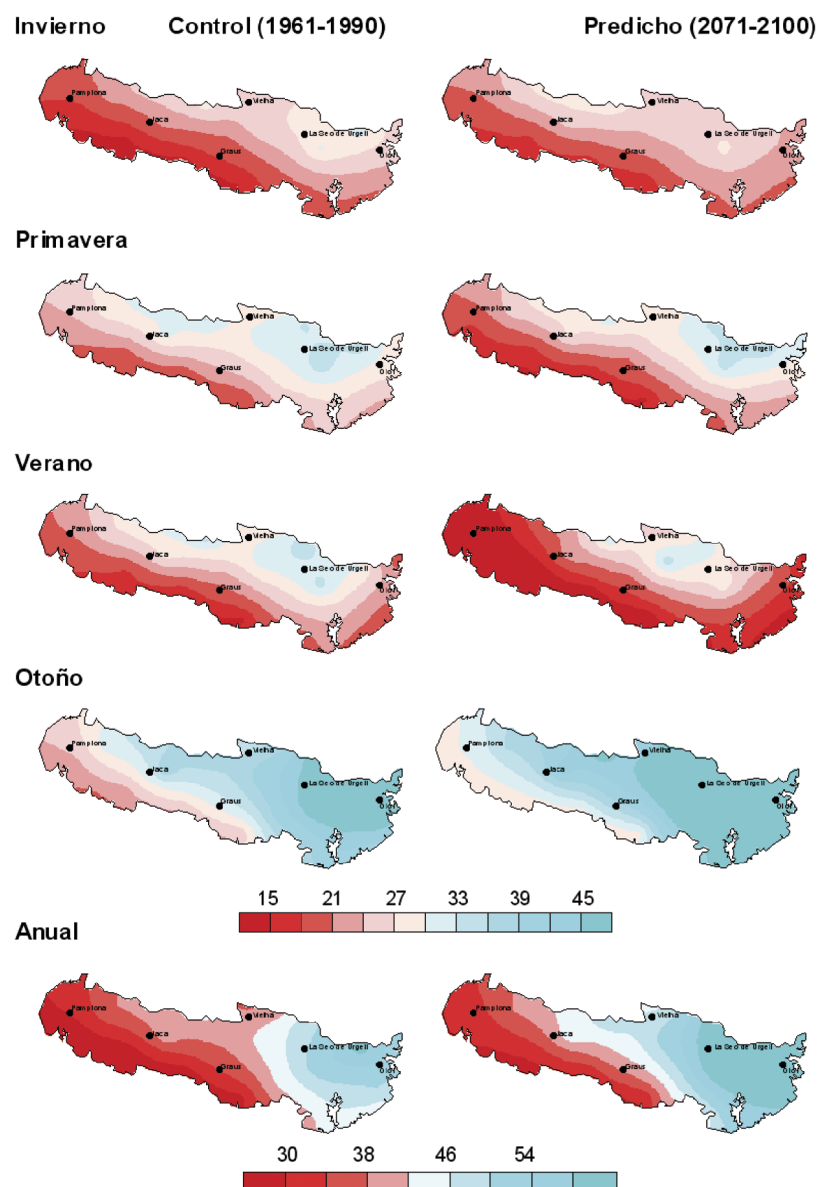


Figura 16. Distribución espacial del promedio del máximo evento estacional y anual. Modelo RAO, SMHI. Periodo de control (1961-1990) y escenario A2 (2071-2100).
 Figure 16. Spatial distribution of average seasonal and annual maximum rainy day. Model RAO, SMHI. Control period (1961-1990) and scenario A2 (2071-2100).

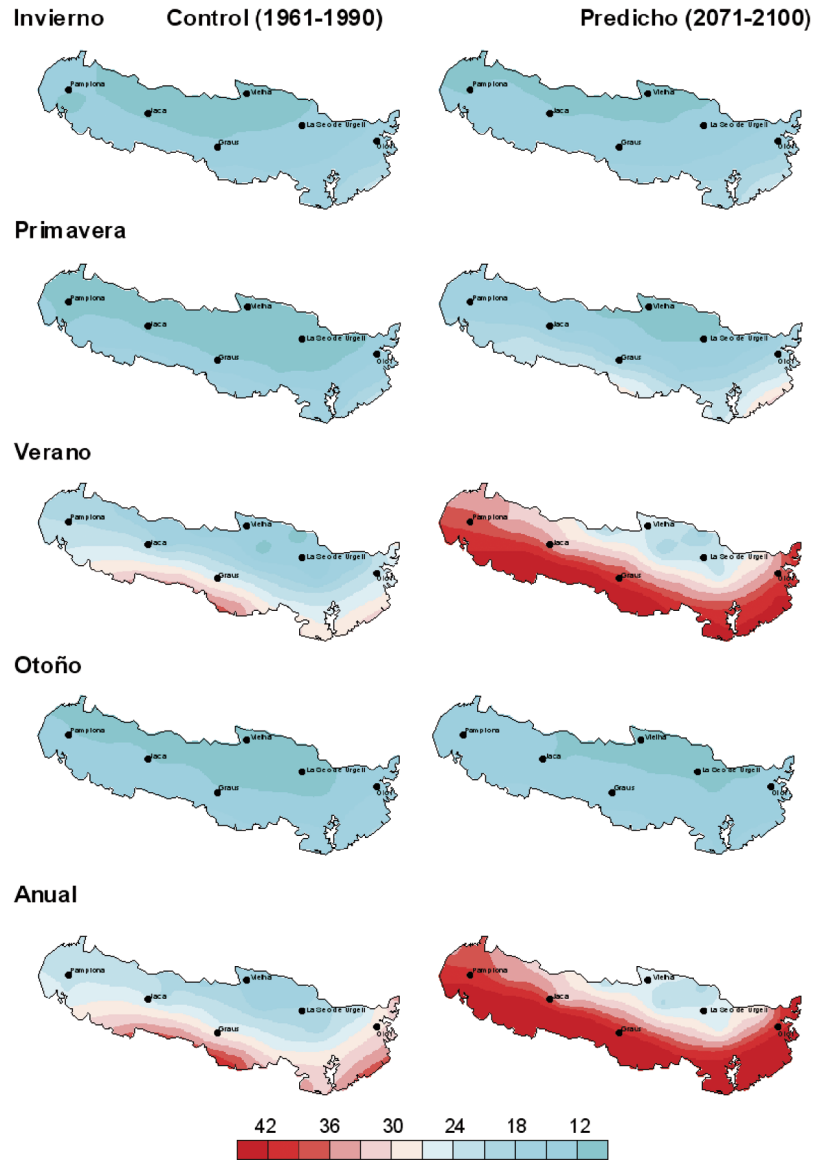


Figura 17: Distribución espacial del promedio de duración en días de la racha seca máxima registrada cada año. Modelo RCAO, SMHI. Periodo de control (1961-1990) y escenario A2 (2071-2100).

Figure 17. Spatial distribution of average seasonal and annual duration of dry spells. Model RCAO, SMHI. Control period (1961-1990) and scenario A2 (2071-2100).

En el caso de los eventos más extremos, la Figura 16 muestra el promedio de los máximos anuales en el periodo de control y la predicción para finales del siglo XXI. Anualmente se registra un aumento en el volumen promedio de los máximos eventos diarios. Sin embargo, existen notables diferencias espaciales, siendo mucho mayor el aumento predicho en las áreas más orientales, mientras que en el sector occidental las variaciones, respecto al periodo de control, son muy poco importantes. El aumento en el sector oriental queda explicado, principalmente, por el incremento en los valores máximos predichos para la estación otoñal. Por el contrario en verano se predice un descenso del volumen de los eventos máximos, al igual que en primavera, aunque en este último caso, con matices espaciales.

Finalmente, es en el caso de las rachas secas de mayor duración donde el modelo predice cambios más importantes para finales del siglo XXI respecto al periodo de control. Anualmente, el promedio de duración de las rachas secas máximas aumenta considerablemente en toda el área de estudio, pero sobre todo en el sur, donde se incrementa, en promedio, en más de 12 días (Figura 17). Estacionalmente se registran notables contrastes, pues mientras en invierno y otoño apenas se reconocen cambios en el periodo predicho respecto al de control, en primavera se predice un ligero aumento en la duración de las máximas rachas secas; no obstante, es en verano donde se registra el principal aumento, que es el que explica el patrón a escala anual observado.

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para el conjunto del área de estudio a partir del valor promedio. Se comprueba claramente el descenso pluviométrico en los volúmenes anuales de 156.7 mm, como consecuencia, fundamentalmente, del descenso en primavera y verano. En estas dos estaciones del año también se predice un importante descenso en el número de días de precipitación entre el periodo de control y el escenario A2 (2071-2100), sobre todo en verano (46% de descenso). No obstante, a pesar del descenso pluviométrico generalizado y la menor frecuencia de precipitaciones, para finales del siglo XXI el modelo predice un aumento de las precipitaciones más extremas, sobre todo en otoño, y un aumento de la duración de las rachas secas más largas. Así pues, el escenario predice menos precipitaciones, pero con el agravante de que éstas se concentrarían en el tiempo, resultando más intensas y siendo las sequías más extremas, de una duración muy superior a las del periodo de control.

Tabla 1: Estadísticos promedio, para toda el área de estudio, de los resultados del modelo RCAO, SMHI para el periodo de control (1961-1990) y el escenario A2 (2071-2100).

Table 1: Average statistics of the model RCAO, SMHI for the control period (1961-1990) and the A2 scenario A2 (2071-2100) for the whole study area.

<i>Volumen</i>	<i>Periodo de control (1961-1990)</i>	<i>Periodo modelizado (2071-2099)</i>
Invierno	246.8	248.2
Primavera	305.6	241.2
Verano	195.2	99.6
Otoño	313.5	313.3
Anual	1061.5	904.8
Días de precipitación		
Invierno	39.5	39.9
Primavera	40.3	34
Verano	25.5	13.8
Otoño	37.1	32.6
Anual	142.4	120.7
Promedio de la máxima anual		
Invierno	22.1	23.03
Primavera	27.1	24.5
Verano	24.6	19.5
Otoño	36.3	45.03
Anual	40.7	47.3
Promedio de duración de la máxima racha seca anual		
Invierno	13.9	14.4
Primavera	12.9	17.8
Verano	22.05	35.3
Otoño	13.3	13.7
Anual	25.9	38.1

4. Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha analizado espacialmente la tendencia experimentada por las precipitaciones y las predicciones para finales del siglo XXI en la totalidad del Pirineo español. Se debe señalar la diversidad espacial en las tendencias pluviométricas observadas entre 1951 y 2002, con patrones diferenciados estacionalmente y contrastes en función de los parámetros analizados. En general, se observa un predominio hacia el descenso de los volúmenes de precipitación anual debido al descenso de primavera y verano. En el caso de la tendencia en el número de días de precipitación la diversidad espacial y estacional es muy alta, aunque en general aumentaría en el sector oriental y

occidental, mientras que en los sectores más septentrionales del centro de la región pirenaica las tendencias son predominantemente negativas a lo largo de todas las estaciones del año. El descenso pluviométrico en los volúmenes de precipitación estaría explicado en mayor medida por el descenso en la frecuencia de las precipitaciones de mayor magnitud, que se han observado principalmente durante la primavera y el verano, que exceptuando algún sector concreto, se registra en la mayor parte del área de estudio. En el caso de los máximos diarios, el patrón general también es hacia el descenso, pero en este caso de magnitud menor y con mayores diferencias espaciales y estacionales. En el caso de las rachas secas (tanto de los valores promedio como de los máximos eventos) la tendencia es la contraria, con un predominio hacia el aumento de la duración en la mayor parte del territorio.

Las tendencias observadas en algunos parámetros pluviométricos a lo largo de la segunda mitad del siglo XX (descenso en el volumen de precipitación y aumento de la duración de las rachas secas) coinciden con lo que el modelo de cambio climático utilizado predice para finales del siglo XXI, con un descenso pluviométrico todavía más acusado que el observado en la segunda mitad del siglo XX. Además, el patrón estacional también coincide en sus rasgos generales, siendo la estación estival en la que mayores descensos pluviométricos y más generalizado ascenso en la duración de las rachas secas se ha observado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX; una intensa reactivación de esta tendencia es predicha por el modelo para finales del siglo XXI. El descenso observado en la segunda mitad del siglo XX se puede explicar por un desplazamiento del cinturón de altas subtropicales hacia latitudes más septentrionales (FERNÁNDEZ & MARTÍN-VIDE, 2004) y por el descenso de las precipitaciones convectivas a consecuencia de un posible debilitamiento en la formación de frentes de brisas (ESTRELA *et al.*, 2006). El descenso de precipitación en primavera y los procesos de cambio en invierno se podría explicar a partir de las tendencias recientes de los patrones de teleconexión como la Oscilación del Atlántico Norte (PAREDES *et al.*, 2006) o la Oscilación del Mediterráneo Oeste (MARTÍN-VIDE & LÓPEZ-BUSTINS, 2006).

Por el contrario, en otros parámetros, como es el caso de la frecuencia de días de precipitación y el volumen de los máximos eventos, la tendencia que muestra el modelo para finales del siglo XXI es muy diferente al patrón de cambio para la segunda mitad del siglo XX. La tendencia observada muestra una elevada diversidad espacial a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, sin patrones claros para el conjunto del Pirineo. En cambio, en el modelo de cambio climático se comprueba un claro cambio hacia una menor frecuencia de precipitaciones, y a un aumento en el volumen de los eventos más extremos, sobre todo en otoño.

Lo observado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX coincide con lo observado en algunos trabajos realizados en la Península Ibérica y en la región Mediterránea (GONZÁLEZ-HIDALGO *et al.*, 2003; BRUNETTI *et al.*, 2001), en los que el descenso pluviométrico, el descenso en la frecuencia de los eventos de mayor intensidad y en el volumen de los máximos anuales, y la mayor frecuencia de rachas secas de larga duración resulta el patrón dominante. Este hecho se asocia fundamentalmente a cambios en patrones de circulación atmosférica y en la frecuencia de diferentes configuraciones sinópticas (HURRELL, 1995; VICENTE-SERRANO & LÓPEZ-MORENO, 2006). No obstante, la elevada diversidad espacial encontrada en la región pirenaica debe hacernos tomar estos patrones de cambio con reservas, ya que la modificación que introduce el relieve pirenaico en la influencia de la circulación atmosférica sobre las precipitaciones puede resultar muy grande (ESTEBAN *et al.*, 2004).

Igualmente, esta misma apreciación puede considerarse para los resultados de las tendencias que predicen los modelos de cambio climático. Aunque diferentes modelos muestran un descenso generalizado de las precipitaciones en la región Mediterránea, como consecuencia de un aumento de la influencia subtropical y un desplazamiento latitudinal de las borrascas asociadas al frente polar, la resolución espacial de estos modelos no permite reflejar fielmente la enorme diversidad de condiciones climáticas que encontramos en la montaña Pirenaica como consecuencia de la diversidad topográfica y su interacción con la circulación atmosférica, por lo que los resultados de dichas predicciones para áreas de montaña tan complejas debe tomarse con reservas, más aún con la incertidumbre que muestran dichos modelos de cambio climático (DEQUÉ *et al.*, 2005; GIORGI, 2005).

No obstante, a pesar de la cautela con la que se deben interpretar las predicciones, no hay que dejar de considerar el patrón general de descenso pluviométrico pues el Pirineo es la principal área fuente de recursos hídricos de la cuenca del Ebro (GARCÍA-RUIZ *et al.*, 2001). Un descenso en el volumen y la frecuencia de las precipitaciones, tal como se ha indicado en este trabajo, tendría importantes consecuencias sobre la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos en el futuro.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación de los siguientes proyectos: CGL2005-04508/BOS, RS-FIRE: CGL2005-04863/CLI y CGL2006-11619HID, financiados por la CICYT y FEDER, PIP176/2005 y Programa de grupos de investigación consolidados financiados por el Gobierno de Aragón (BOA 48, 20-04-2005).

Referencias

- BRUNETTI, M.; MANGUERI, M. & NANNI, T. (2001). Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *International Journal of Climatology*. 21: 861-871.
- CREUS, J. (1983). *El clima del alto Aragón occidental*. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 421 pp. Jaca.
- DEQUÉ, M.; JONES, R.G.; WILD, M.; GIORGI, F.; CHRISTENSEN, J.H.; HASSELL, D.C.; ROCKEL, B.; JACOB, D.; KJELLSTRÖM, E.; DE CASTRO, M.; KUCHARSKI, F.; VAN DER HURK, H. (2005). Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate Dynamics*. 25: 653-670.
- DE LUIS, M.; RAVENTÓS, J.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; SÁNCHEZ, J.R. & CORTINA, J. (2000). Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *International Journal of Climatology* 20: 1451-1469.
- ESTEBAN, P.; SOLER, X.; PROHOM, M. & PLANCHON, O. (2002). La distribución de la precipitación a través del índice NAO. El efecto del relieve a escala local: el Pirineo Oriental. En *El agua y el clima*. (GUIJARRO J.A.; GRIMALT, M.; LAITA, M. & ALONSO, S. Eds.). AEC. Mallorca. 25-34.
- ESTRELA, M.J., MIRÓ, J.J. & MILLÁN, M. (2006). Análisis de tendencia de la precipitación por situaciones convectivas en la Comunidad Valenciana (1959-2004). *V Congreso de la asociación española de Climatología*, 125-136. Zaragoza.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, A.J. & MARTÍN-VIDE, J. (2004). Tendencias de los patrones de circulación estivales en Europa occidental en la segunda mitad del siglo XX. Precipitaciones estivales asociadas en la Península Ibérica. *IV Congreso de la Asociación Española de Climatología*. 4: 273-293. Santander.
- GARCIA-RUIZ, J.M.; PUIGDEFÁBREGAS, J. & CREUS, J. (1985). *Los recursos hídricos superficiales del alto Aragón*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 2: 224 pp. Huesca.
- GARCIA-RUIZ, J.M.; BEGUERIA, S.; LOPEZ-MORENO, J.I.; LORENTE, A. & SEEGER, M. (2001). *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geoforma Ediciones, 192 pp., Logroño.
- GIORGI, F. (2005). Climatic change prediction. *Climatic Change*, 73: 239-265.
- GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; DE LUIS, M.; RAVENTOS, J. & SÁNCHEZ, R. (2003). Daily rainfall trend in the Valencia Region of Spain. *Theoretical and Applied Climatology* 75: 117-130.
- HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GIGGS, D.; NOGUET, M.; VAN DEL LINDEN, P.; DAI, X.; MASKELL, A. & JOHNSON, C.A. (2001). *Climate Change 2001: The scientific Basis*. Eds. Cambridge University Press. Cambridge.

- HURRELL, J. (1995). Decadal trends in North Atlantic Oscillation and relationship to regional temperature and precipitation. *Science* 269: 676-679.
- JONES, P.D. & HULME, M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16: 361-377.
- LANZANTE, J.R. (1996). Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology* 16: 1197-1226.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. (2006). *Cambio ambiental y gestión de los embalses en el Pirineo Central Español*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza, 208 p.
- LÓPEZ-MORENO, J.I., GOYETTE, S. & BENISTON M. (2007). Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and expected changes over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*. En revision.
- MARTÍN-VIDE, J. & LÓPEZ-BUSTINS, J.A. (2006). The western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 26: 1455-1475.
- NOGUÉS-BRAVO, D.; ARAÚJO, M.B., ERREA, M.P. & MARTÍNEZ-RICA, J.P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.11.007.
- PEREDES, D., TRIGO, R.M., GARCÍA-HERRERA, R. & TRIGO, I.F. (2006). Understanding precipitation changes in Iberia in early spring: weather typing and storm-tracking approaches. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 101-113.
- SALINGER, M.J.; BASBER, R.E.; FITZBARRIS, B.B.; HAY, J.E.; JONES, P.D.; MACEIGHT, J.P. & SCHMIDELY-LELEU I. (1995). Climatic trends in the south-west Pacific. *International Journal of Climatology* 15: 285-302.
- VICENTE-SERRANO, S.M. & LÓPEZ-MORENO, J.I. (2006). The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in northeast Spain. *International Journal of Climatology* 26: 1427-1453.
- VIVIROLI, D. & WEINGARTNER, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Science* 8: 1016-1029.
- WHEELER, D. & MARTÍN-VIDE, J. (1992). Rainfall characteristics of mainland Europe's most southerly stations. *International Journal of Climatology* 12: 69-76.