

Análisis hidrológico-hidráulico de un posible escenario de cambio climático en una pequeña cuenca del Pirineo central

(Hidrología, usos y gestión del agua)

Brufau P., García-Navarro P., Abaurrea J., Asín J.

Universidad de Zaragoza

brufau@unizar.es, pigar@unizar.es, abaurrea@unizar.es, jasin@unizar.es

García-Ruiz J.M.

Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC)

humberto@ipe.csic.es

Lana-Renault N.

Universidad de La Rioja

noemi-solange.lana-renault@unirioja.es

1 Introducción

Las consecuencias del Cambio Global sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos es en la actualidad uno de los tópicos estudiados con mayor interés. Las previsiones sobre la evolución de las temperaturas y precipitaciones, basadas en modelos de diferente resolución y grado de incertidumbre, alertan sobre la posibilidad de que los recursos hídricos experimenten a corto y medio plazo importantes fluctuaciones con tendencia negativa. A ello se añade la confirmación del papel de la cubierta vegetal en el ciclo del agua. Estudios recientes [Beguiría et al. 2003; Morán-Tejeda et al. 2010] han demostrado que en las últimas décadas se ha producido un cambio en las relaciones entre precipitación y escorrentía, particularmente en las montañas mediterráneas, de manera que para una misma precipitación se genera cada vez menos escorrentía. Igualmente se ha constatado que la frecuencia de avenidas es cada vez menor, sin que haya cambiado la frecuencia con la que ocurren las precipitaciones extremas [López-Moreno et al. 2006]. A falta de análisis más detallados, estos cambios sólo pueden atribuirse a la evolución de los usos del suelo y de la cubierta vegetal, que habría aumentado el consumo de agua y la interceptación. La aproximación experimental en cuencas de pequeño tamaño permite el estudio detallado de los procesos de generación de escorrentía, así como la calibración y validación de modelos hidrológicos. Este trabajo se ha centrado en la cuenca experimental de Arnás, donde se registran precipitaciones, temperaturas, caudal, transporte de sedimentos, humedad del suelo y altura de la capa freática [Lana-Renault et al. 2007a, 2010].

Para la evaluación de los posibles cambios en el régimen hidrológico de Arnás en un escenario de cambio climático, se han generado series de precipitación diaria en el escenario SRES A1B en los periodos 2031-60 y 2071-2100, utilizando un modelo estadístico que, anidado en el modelo de circulación general (GCM) ECHAM5, efectúa el downscaling del proceso de precipitación diaria a escala local y obtiene las series proyectadas. En las trayectorias simuladas se seleccionan años con precipitación abundante (trayectoria húmeda), escasa (trayectoria seca) y media (trayectoria normal), y las series correspondientes se utilizan como entrada del modelo hidrológico. Dado el reducido registro pluviométrico disponible en Arnás, insuficiente para ajustar el modelo de downscaling, la precipitación en la cuenca se obtiene utilizando un modelo estadístico adicional, capaz de generar el proceso de lluvia en Arnás a partir del registrado en Canfranc, un observatorio próximo, con mayor periodo de registro. Por otra parte, para atender las necesidades de resolución temporal del modelo hidrológico-hidráulico, que requiere, al menos, series de precipitación horaria, se ha desarrollado, utilizando la serie observada en Arnás, un modelo estadístico que desagrega la precipitación diaria en horaria. En este trabajo se comparan, a escala de evento, las medidas de precipitación-escorrentía tomadas en la cuenca experimental de Arnás con los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones hidrológicas con el método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service, Estados Unidos) y se analiza el comportamiento de la cuenca frente a diferentes trayectorias en un escenario de Cambio Climático desde 2031 a 2100. Además, para conocer el posible cambio en el funcionamiento hidrológico de la cuenca de Arnás, en cuanto a caudal y

frecuencia e intensidad de precipitaciones, si se producen perturbaciones ambientales como cambios en la cubierta vegetal o en el uso del suelo, se estudian escenarios de reforestación (plantación de árboles en zonas que se han quedado sin vegetación) y desertización (la cubierta vegetal se vuelve estacional de tipo cereal y barbecho, el bosque desaparece, correspondería a un escenario de principios del siglo pasado).

2 Descripción de la cuenca experimental

La cuenca de Arnás (284Ha) se localiza en la parte alta del río Aragón (Pirineo central), entre 900 y 1330m s.n.m. (Figura 1) [García-Ruiz et al. 2005, Lana-Renault et al. 2010]. El sustrato rocoso alterna láminas delgadas de areniscas y margas y pendientes situadas predominantemente entre el 20 y el 40%. El barranco de Arnás circula de oeste a este, dando lugar a un fuerte contraste topográfico entre la ladera solana, con un abrupto frente de cuesta, y la ladera umbría, de pendiente más suave, coincidiendo con un prolongado reverso de cuesta. El clima predominante es sub-mediterráneo de montaña con influencias atlánticas. La precipitación anual media es de 1000mm en la parte baja de la cuenca. Las precipitaciones máximas tienen lugar en otoño y primavera, si bien las tormentas estivales son muy frecuentes. Ocasionalmente se registran precipitaciones en forma de nieve, aunque sólo permanecen unos días en el suelo.

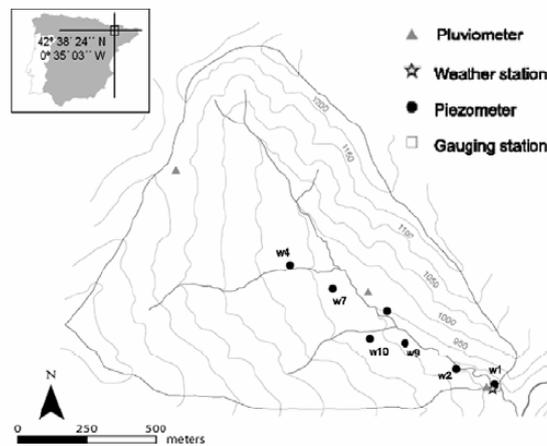


Figura 1 Localización de la cuenca de Arnás, líneas de nivel de la topografía e instrumentación para la toma de datos

La cuenca fue cultivada hasta hace 40 años, luego abandonada y afectada por recolonización vegetal. En la actualidad los antiguos campos de cultivo se hallan cubiertos de matorral, con tendencia a bosque abierto. En la ladera solana domina el regosol calcáreo, con baja capacidad de retención de agua y elevada pedregosidad, mientras que la umbría conserva suelos más profundos de tipo kastanozem. Una precipitación de pocos milímetros es suficiente para producir un repentino incremento de caudal debido a la pendiente, al pequeño tamaño de la cuenca y a la presencia de áreas con baja densidad de vegetación y suelos delgados. En general, el tipo de respuesta hidrológica muestra una alta variabilidad dependiendo de la intensidad de las precipitaciones y de las condiciones precedentes de humedad. La forma del hidrograma sugiere que la cuenca de Arnás es dominada, al menos parcialmente, por procesos de generación de escorrentía superficial. Sin embargo, las relaciones entre la dinámica de la capa freática y la respuesta hidrológica confirma la existencia de amplias áreas dominadas por la infiltración [Lana-Renault et al. 2007b].

3 Generación de series de precipitación

Como es sabido, los actuales GCM, que son las mejores herramientas existentes para caracterizar el clima futuro, no son capaces de representar adecuadamente la climatología a escala regional y local de bastantes variables, entre ellas la precipitación. Por ello, la obtención de trayectorias de precipitación en un escenario de clima futuro en la escala regional-local, necesarias para el análisis de impactos, requiere de modelos auxiliares, que pueden

ser de tipo estadístico o de tipo numérico a escala regional. Estos modelos alimentados por el GCM deben reproducir las características de la precipitación regional-local, lo que se comprueba verificando que el modelo, alimentado por una trayectoria de control 20c3M del GCM, generada bajo las condiciones de forzamiento históricas del siglo XX, produce trayectorias estadísticamente equivalentes a la observada en el territorio de interés. Nuestro estudio requiere trayectorias horarias de precipitación en la cuenca de Arnás en los periodos 2031-60, 2071-2100 en un escenario de cambio climático, que se ha tomado SRES A1B; el GCM director utilizado es ECHAM5-OM, del centro Max Planck. El modelo estadístico de downscaling empleado [Abaurrea y Asín 2005] requiere una muestra de estimación de una longitud suficiente, para que el modelo estadístico capture las relaciones entre las variables atmosféricas de gran escala y la precipitación local. Este requisito no se verifica en Arnás, que contaba, al realizar este estudio, con los registros de un pluviómetro de balancín para el periodo comprendido entre octubre de 2002 y agosto de 2007, con lagunas de cierta longitud. Por este motivo se decidió ajustar el modelo de downscaling utilizando la serie de precipitación diaria 1987-2001 de la estación de AEMET en Canfranc-Los Arañones, un lugar a 10km aproximadamente de Arnás, con un registro de calidad y muy completo en ese periodo.

3.1 Modelo de downscaling para la precipitación diaria en Canfranc

El modelo consta de dos submodelos, uno para la ocurrencia (de, al menos, 1mm de precipitación), que es un modelo lineal generalizado (GLM) con error binario, y otro para la cantidad recogida cuando ocurre precipitación, un GLM con error gamma. Dada la inhomogeneidad del proceso de precipitación a lo largo del año, se han ajustado dos modelos distintos, uno en la época veraniega, Jn-Jl-Ag, y otro en el resto del año. Los dos submodelos son de tipo regresión y buscan explicar la variabilidad de la variable respuesta en función de los valores que toman otras variables, denominadas predictores o covariables. En el modelo sólo se utilizan predictores que el GCM representa adecuadamente, es decir, variables cuyas características en la trayectoria 20c3M son estadísticamente equivalentes a las de las correspondientes variables observadas, recogidas en el reanálisis ERA40 de resolución 2.5°x 2.5°. Esto, por una parte, restringe el uso de variables predictoras de gran interés, como las variables relacionadas con el viento, cuya dirección el GCM no reproduce bien, y, por otra, obliga a trabajar con variables transformadas, anomalías o anomalías estandarizadas, para evitar los sesgos cometidos por el GCM. Otra característica que se exige a los predictores potenciales es que su distribución en los periodos 2031-60 y 2071-2100, cuando el modelo los utilice para generar proyecciones, no debe estar sensiblemente desplazada respecto de su distribución a finales del siglo XX, periodo en el que se ajusta el modelo y se verifica su validez. La ausencia de este control puede significar la obtención de proyecciones inadecuadas, por utilizar un modelo que no es válido, debido a que opera en condiciones de extrapolación en relación con su rango de validez. Como resultado de este doble proceso de selección se consideran predictores potenciales, entre otros, las anomalías de la humedad específica en 850hPa, la divergencia en 300hPa, la vorticidad en 700, 500 y 300hPa y la diferencia de temperaturas Sup-300 y 850-500hPa o las anomalías estandarizadas de la altura geopotencial en 700, 500 y 300hPa.

El modelo se ajusta utilizando los valores observados de la respuesta en Canfranc y de los predictores seleccionados en los 4 nodos de la malla de ERA40 que rodean a Canfranc, registrados a las 0, 6, 12, 18h del día correspondiente a la respuesta y de los días anterior y siguiente; se valida analizando los valores ajustados que produce cuando se usan como predictores las variables generadas por ECHAM5 en su trayectoria 20c3M. Una vez alcanzado un modelo sin sesgos importantes, se simulan, usando los datos del GCM, 20 trayectorias de precipitación diaria siglo XX, cuyas tasas y valores medios, así como sus percentiles extremos, se contrastan con los de la trayectoria observada. El porcentaje de variabilidad explicada por los modelos de ocurrencia para los periodos septiembre-mayo y junio-agosto es un 57.6 y 44.7%, respectivamente, y los valores correspondientes para los modelos de cantidad, 39.1 y 42.9%.

	Global	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Frecuencia relativa observada	0.35	0.41	0.26	0.39	0.36
Media de la probabilidad ajustada por el modelo usando ERA40.	0.36	0.42	0.26	0.39	0.35
% desviación respecto al valor observado	0.15	2.56	0.001	0.43	-2.93
Media de la probabilidad ajustada por el modelo usando E5 20c3M	0.36	0.43	0.24	0.4	0.35
% desviación respecto al valor observado	0.53	5.92	-7.21	2.69	-2.54
Valor medio observado	5.03	5.05	3.22	6.6	5.27
Media del valor ajustado por el modelo usando ERA40	5.01	5.12	3.18	6.68	5.06
% desviación respecto al valor observado	-0.30	1.44	-1.03	1.18	-3.91
Media del valor ajustado por el modelo usando E5 20c3M	4.8	5.1	3.0	6.5	4.5
% desviación respecto al valor observado	-4.51	1.29	-6.63	-0.41	-14.2

Tabla 1 Sesgos en la reproducción de la frecuencia relativa y en el valor medio de la cantidad de precipitación diaria en Canfranc, usando el modelo estadístico con los datos de ERA40 y con los de ECHAM5-20c3M.

En la Tabla 1 se muestran las desviaciones, en porcentaje, respecto de los valores medios anuales y estacionales observados de la frecuencia y la cantidad de precipitación, de los valores que ajusta el modelo cuando se aplica con los datos de ERA40 y con los de ECHAM5-20c3M. Los resultados son satisfactorios, todos los sesgos son menores del 8%, salvo para la cantidad media en invierno, donde el sesgo es de un 14%.

3.2 Obtención de trayectorias de precipitación horaria en Arnás

El modelo anterior, utilizando los valores de las covariables en la trayectoria ECHAM5-A1B, puede simular trayectorias verosímiles de precipitación diaria en Canfranc, para los periodos 2031-60 y 2071-2100, en ese escenario de cambio climático. Para obtener las trayectorias diarias de precipitación proyectada en Arnás se ha utilizado un modelo estadístico que se ajusta utilizando los días en que se dispone de registro en ambos lugares. Ese modelo consiste en un GLM con error multinomial que ajusta la probabilidad de que en Arnás un día se clasifique en una de las 4 categorías siguientes: día seco ó día con precipitación de un orden menor, similar o superior a la de Canfranc, categorías que se definen a partir de los umbrales 80 y 120%. El submodelo que ajusta la precipitación observada en Arnás en un día húmedo depende de la categoría seleccionada por el modelo multinomial y se basa en las distribuciones uniforme o lognormal. Las covariables utilizadas, además de señales armónicas para captar la estacionalidad, son la precipitación medida en Canfranc los días contemporáneo y siguiente. La calidad de este modelo de transferencia se evaluó simulando 20 trayectorias de precipitación diaria en Arnás, para los días en los que existe registro en Arnás y en Canfranc. En todas ellas, las hipótesis nulas relativas a la igualdad de frecuencias y de distribución de las cantidades no inferiores a 1mm no fueron rechazadas.

El modelo hidrológico-hidráulico utilizado requiere que la resolución del input de precipitación sea, al menos, horaria. La desagregación de la precipitación acumulada en 24 horas en Arnás se realizó empleando un modelo estadístico consistente en una regresión logística que ajusta la probabilidad de que, en un día con precipitación, se produzca precipitación positiva en una hora dada. El segundo submodelo es un GLM con error gamma que ajusta la cantidad acumulada en una hora en la que se produce precipitación. Ambos modelos, además de señales armónicas, emplean como covariables la precipitación acumulada en el día completo y la de la hora anterior. El procedimiento de desagregación se basa en la simulación de ese modelo. En primer lugar se sortea la ocurrencia o no de lluvia en cada hora, recorriendo secuencialmente las horas del día y, a continuación, se simulan las cantidades medidas en las horas con precipitación. Por último se aplica un factor de corrección a cada precipitación horaria positiva para que la precipitación acumulada en el día coincida con el valor dado. El modelo ajustado en Arnás explica un 39% de la variabilidad de la ocurrencia y un 19.5% de las cantidades. La simulación del modelo en las condiciones observadas ha permitido valorar su capacidad para reproducir las características de la distribución de la precipitación horaria. En la Tabla 2 se muestra el grado de coincidencia reproduciendo la frecuencia relativa de precipitación apreciable y las correspondientes a la persistencia de los estados húmedo y seco.

	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Frecuencia relativa de $Y(t)>0$	0.26	0.24	0.26	0.24	0.15	0.16	0.28	0.25
Frecuencia relativa de $Y(t)>0 Y(t-1)>0$	0.7	0.65	0.71	0.67	0.52	0.6	0.71	0.65
Frecuencia relativa de $Y(t)=0 Y(t-1)=0$	0.89	0.89	0.9	0.89	0.91	0.92	0.89	0.88

Tabla 2 Frecuencia relativa de precipitación positiva ($Y(t)>0$) y de persistencia en los estados húmedo y seco.

4 Modelo hidrológico-hidráulico

Los modelos hidrológicos que se usan en la simulación de este tipo de procesos dependen de la información de la que se dispone y del nivel de precisión que se quiere alcanzar en los resultados. Si se trata de una cuenca extensa con poca información o si se trata de una cuenca no muy grande pero se dispone de poca información y además se quieren llevar a cabo simulaciones rápidas para evaluar muchas trayectorias, se necesita un modelo

hidrológico sencillo como es el método del número de curva SCS junto a un modelo hidráulico fiable y rápido como es un modelo 1D [Burguete y García-Navarro 2001].

El SCS es un modelo agregado en el que sólo se necesitan conocer, además de la topografía de la cuenca, dos parámetros: el coeficiente de rugosidad de Manning y el número de curva. En particular, las variables geométricas necesarias para estimar la escorrentía son el área de la cuenca, la pendiente y la longitud hidráulica; el número de Manning se utiliza para el cálculo del flujo en canales abiertos y da cuenta de la rugosidad del tipo de suelo y de la geometría [Chow 1959] y el número de curva es un parámetro adimensional tabulado que está relacionado con la cubierta vegetal del terreno, con el tipo de suelo y con la humedad del mismo. El modelo del número de curva utilizado en este trabajo es una combinación del método del número de curva y el método del hidrograma unitario. El primero de ellos calcula el caudal efectivo que se produce como respuesta a un evento de precipitación, de esta manera se calcula la precipitación efectiva. El método del hidrograma unitario calcula a partir de la precipitación efectiva el caudal $Q(t)$ a la salida de la cuenca. Este método ha sido modificado a la hora de simular posibles escenarios de Cambio Climático de manera que tiene en cuenta la estación en la que se ha producido el evento. Esto significa que habrá cambios entre condición activa e inactiva. En condiciones activas hay una mayor densidad de vegetación, y por tanto una mayor capacidad para absorber el agua de lluvia. Según la precipitación acumulada el número de curva cambia en función de los cinco días anteriores y es capaz de dividir los datos de precipitación en diferentes eventos. Por otro lado, el modelo hidráulico elegido es el Guad1D [Burguete y García-Navarro 2001]. Es un módulo de cálculo creado para resolver numéricamente flujos transitorios unidimensionales y transporte con difusión en cauces de geometría arbitraria. El programa conecta los datos o previsiones de lluvia o caudal de las diferentes subcuencas obtenidos con el SCS y los transporta a lo largo del cauce dando como resultado un único hidrograma de salida para toda la cuenca.

5 Calibración de resultados numéricos

La validación de los modelos de simulación es un paso fundamental para comprobar su adecuación y capacidad predictiva. En esta sección se analizan cuatro eventos extremos ocurridos en la cuenca de Arnás con datos medidos de precipitación y escorrentía en la estación de aforo. Dos de ellos corresponden a eventos secos (13/10/2005 y 15/08/2006) y otros dos a eventos húmedos (23/11/2003 y 23/09/2006). Para cada uno de estos eventos se calcula el caudal de escorrentía en la estación de aforo del cauce y se compara con los datos medidos.

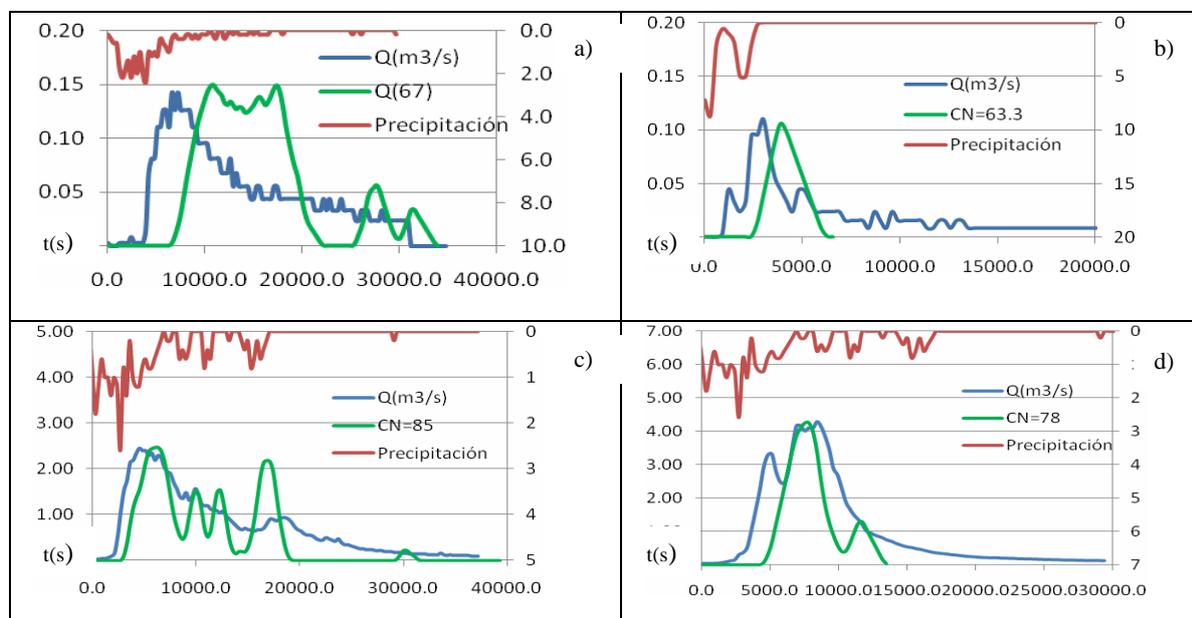


Figura 2 Evolución temporal de precipitación en mm (color rojo, escala derecha), escorrentía medida en mm^3/s (color azul, escala izquierda) y escorrentía calculada (color verde, escala izquierda); a) evento del 13/10/05, b) evento del 15/08/06, c) evento del 23/11/03 y d) evento del 23/09/06.

En la Figura 2 se observan los números de curva más apropiados obtenidos para cada tipo de evento (CN). Los resultados numéricos de escorrentía se ajustan a las medidas realizadas, aunque los modelos de simulación no son capaces de recoger las colas de los hidrogramas de caudal observados. Puede ser que este caudal provenga de exfiltraciones del freático que no se tienen en cuenta en el cálculo. Se comprueba que los valores de caudal pico y los tiempos de llegada de los frentes se ajustan bien a las medidas experimentales.

6 Análisis de un escenario de Cambio Climático a medio y largo plazo

Durante los primeros 30 años de análisis (2031-2060) se mantiene constante el número de curva 67, que es el obtenido para esta cuenca calibrando los resultados numéricos con las medidas experimentales de la sección anterior. El análisis se lleva a cabo con un número de curva adecuado para evento seco y el programa lo modificará en función de que el evento se encuentre en estación activa o inactiva. Se analizará qué ocurre si las condiciones de suelo y vegetación continúan a largo plazo, manteniendo el número de curva de 67 durante el periodo 2071-2100. Esta situación correspondería a que no hubiera ningún cambio significativo ni en el suelo ni en la vegetación de la cuenca. Se analizan los resultados bajo tres trayectorias de precipitación: seca, normal y húmeda. En la Figura 3 se muestran las gráficas de los resultados numéricos en los periodos 2075-2078 y 2096-2100; a continuación se resumen en una tabla los valores máximos de precipitación y escorrentía alcanzados en cada periodo de 4 años. Se observa que el evento de precipitación-escorrentía máximo se produce en la trayectoria húmeda.

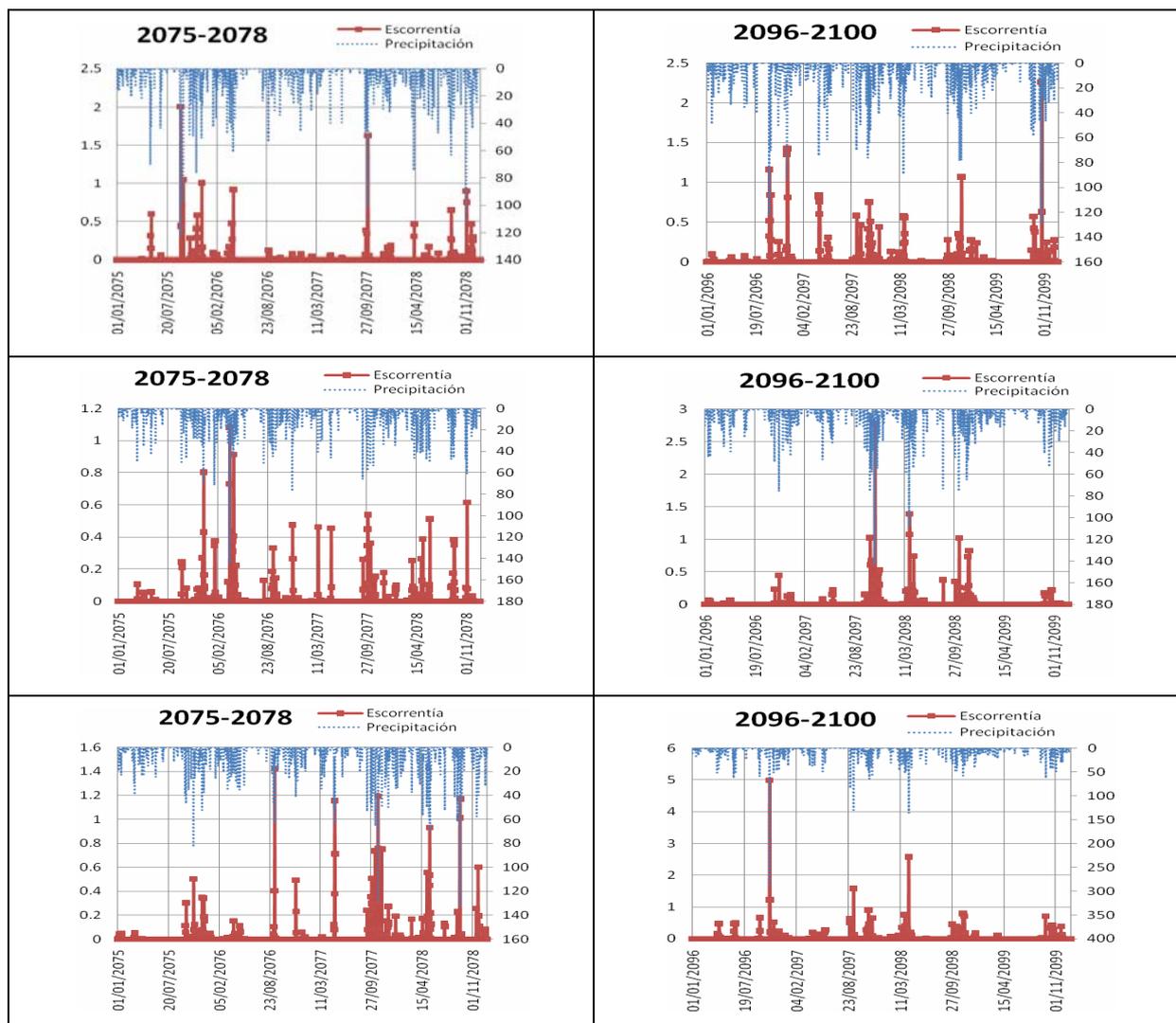


Figura 3 Evolución temporal de precipitación en mm (color azul, escala derecha) y escorrentía en mm³/s (color rojo, escala izquierda) a largo plazo bajo trayectoria seca, normal y húmeda.

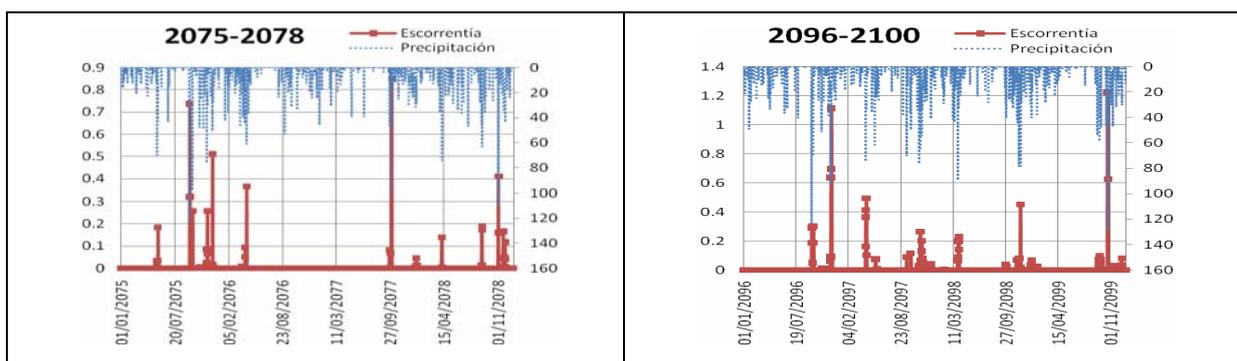
VALORES MÁXIMOS						
Años	Trayectoria seca		Trayectoria normal		Trayectoria húmeda	
(1971-2000)	P (mm)	Q (mm ³ /s)	P (mm)	Q (mm ³ /s)	P (mm)	Q (mm ³ /s)
1971-1974	135	1.71	145	1.98	89.7	1.75
1975-1978	122	2	148	1.08	132.7	1.42
1979-1982	138.3	2.91	96.9	1.59	138.8	2.6
1983-1986	72.9	0.56	69.1	0.69	153.7	3.02
1987-1990	75	0.67	152	2.68	103.6	2.08
1991-1995	146.5	3.02	120.4	1.19	135.6	3.34
1996-2000	128.9	2.26	142	2.79	287.7	5

Tabla 3 Distribución de eventos extremos de precipitación y escorrentía en periodos de 4 años según la trayectoria.

7 Análisis de perturbaciones ambientales a largo plazo

Durante los primeros 30 años de análisis (2031-2060) el modelo mantiene el número de curva constante 67. En los años 2071-2100 se plantean diferentes perturbaciones ambientales (i.e. cambio en la cubierta vegetal y en el suelo) modificando el número de curva. Se simula lo que ocurre en el caso de que se produzca una reforestación (número de curva 46) o si se produce una desertización (número de curva 72). Se parte de la idea de que no hay variación en la capacidad de infiltración del tipo de suelo. En ambas situaciones se analizan los resultados bajo tres trayectorias de precipitación: seca, normal y húmeda. Se muestran las gráficas de los resultados numéricos en los periodos 2075-2078 y 2096-2100.

7.1 Reforestación



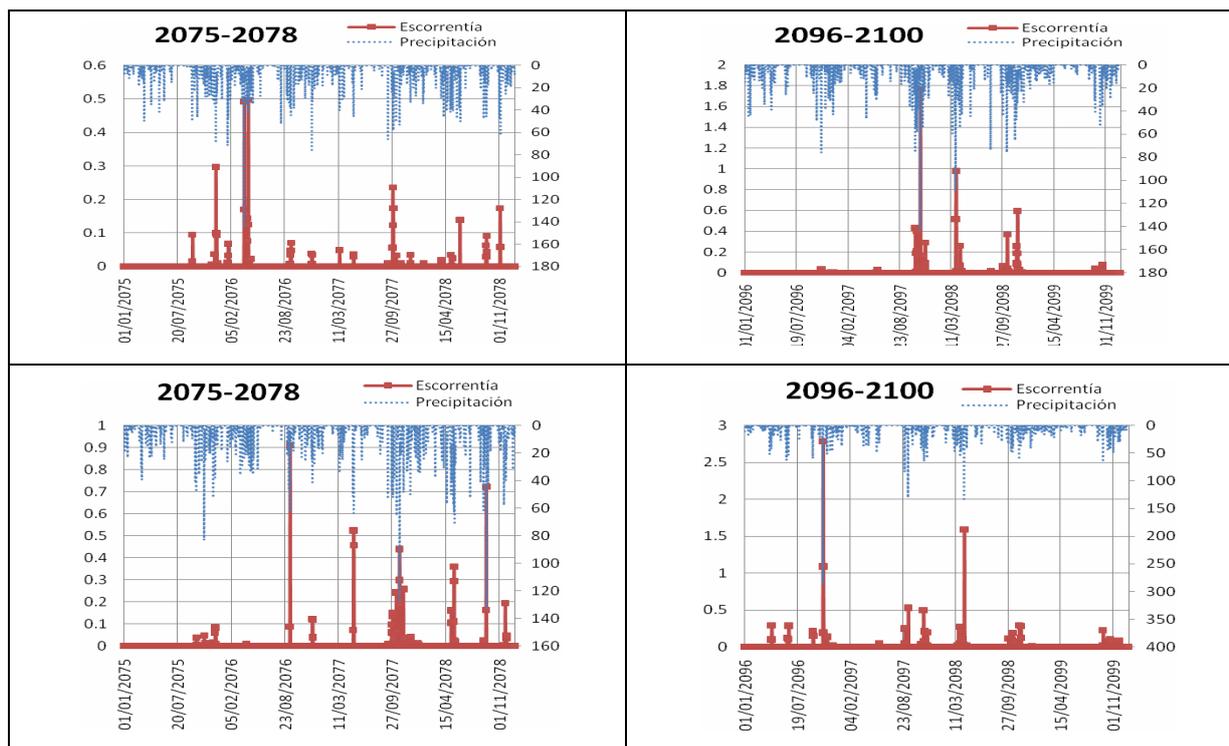


Figura 4 Evolución temporal de precipitación en mm (color azul, escala derecha) y escorrentía en mm^3/s (color rojo, escala izquierda) a largo plazo bajo trayectoria seca, normal y húmeda en un escenario de reforestación

VALORES MÁXIMOS						
Años	Trayectoria seca		Trayectoria normal		Trayectoria húmeda	
	P (mm)	Q (mm^3/s)	P (mm)	Q (mm^3/s)	P (mm)	Q (mm^3/s)
(1971-2000)						
1971-1974	135	1.15	145	1.46	89.7	1.45
1975-1978	122	0.85	148	0.49	132.7	0.91
1979-1982	138.3	1.94	96.9	0.8	138.8	1.61
1983-1986	72.9	0.25	69.1	0.22	153.7	1.95
1987-1990	75	0.17	152	1.53	103.6	1.18
1991-1995	146.5	1.96	120.4	0.6	135.6	2.37
1996-2000	128.9	1.22	142	1.76	287.7	2.78

Tabla 4 Distribución de eventos máximos de precipitación y escorrentía en periodos de 4 años en reforestación.

7.2 Desertización

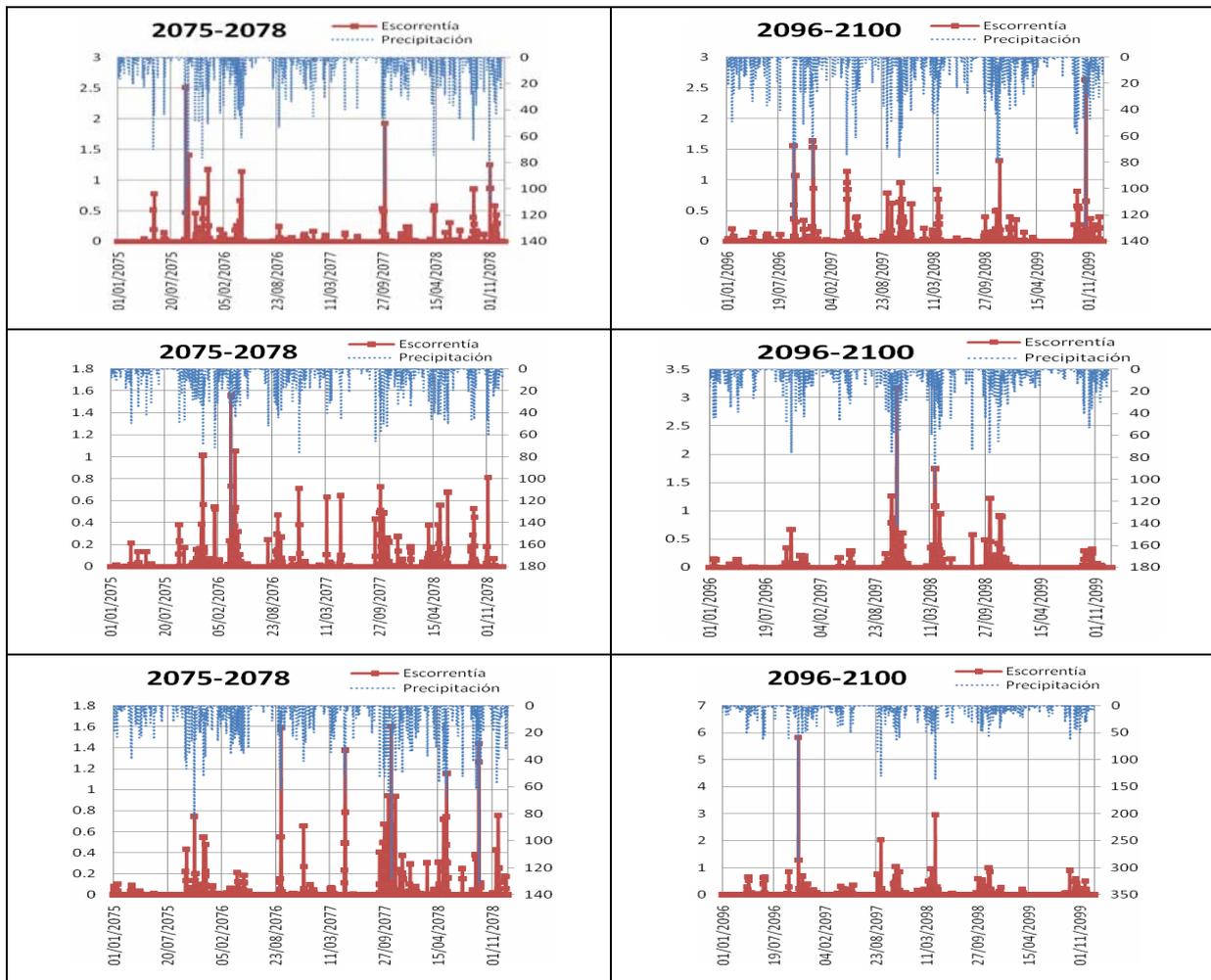


Figura 5 Evolución temporal de precipitación en mm (color azul, escala derecha) y escorrentía en mm³/s (color rojo, escala izquierda) a largo plazo bajo trayectoria seca, normal y húmeda en un escenario de desertización.

VALORES MÁXIMOS						
Años	Trayectoria seca		Trayectoria normal		Trayectoria húmeda	
	P (mm)	Q (mm ³ /s)	P (mm)	Q (mm ³ /s)	P (mm)	Q (mm ³ /s)
(1971-2000)						
1971-1974	135	1.95	145	1.45	89.7	1.86
1975-1978	122	2.5	148	1.56	132.7	1.6
1979-1982	138.3	3.4	96.9	1.85	138.8	3.01
1983-1986	72.9	0.67	69.1	0.91	153.7	3.42
1987-1990	75	0.75	152	3.11	103.6	2.41
1991-1995	146.5	3.4	120.4	1.57	135.6	3.67
1996-2000	128.9	2.6	142	3.17	287.7	5.82

Tabla 5 Distribución de eventos máximos de precipitación y escorrentía en periodos de 4 años en desertización.

8 Conclusiones

Se ha usado una combinación del modelo hidrológico SCS y el modelo hidráulico Guad1D para caracterizar el comportamiento de una cuenca pequeña situada en el Pirineo central frente a eventos de precipitación. Se ha calibrado el número de curva para dos eventos en condiciones secas y dos en condiciones húmedas comparando los resultados numéricos con las medidas experimentales. Se ha llevado a cabo el análisis hidrológico-hidráulico de esta cuenca a medio (2031-2060) y largo plazo (2071-2100). Para ello se utiliza el método del número de curva ligeramente modificado. Se impone como dato de entrada el número de curva en condiciones secas y posteriormente el programa calcula el número de curva para condiciones húmedas. En el análisis a medio plazo, no se considera que vaya a haber un cambio excesivo en el número de curva; sin embargo a largo plazo el número de curva puede variar. Se han planteado tres trayectorias: mantener el número de curva, o que haya perturbaciones ambientales como una reforestación (número de curva 46) o una desertización (número de curva 72). En el caso de reforestación se obtienen caudales de escorrentía pequeños y menor frecuencia de precipitaciones máximas que en el resto de los casos. No es así para el caso de desertización en el que se encuentran los máximos de caudal, y mayor frecuencia de precipitaciones máximas. Esto se debe a que si ocurre reforestación, el número de curva disminuye; al haber más vegetación la capacidad de captar agua es mayor y llega menos cantidad al suelo. En el caso de desertización, el número de curva aumenta, al haber menos vegetación, escurrirá mayor caudal. Si se analizan los valores máximos de caudal en todas las situaciones se observa que los valores de precipitación máxima se dan en el periodo 2096-2100, siendo la escorrentía superficial mayor en el caso de desertización y menor en el caso de reforestación.

9 Referencias bibliográficas

- Abaurrea, J., Asín, J., 2005. Forecasting local daily precipitation patterns in a climate change scenario. *Climate Research*, 28, 183-197.
- Beguiría, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J. M., 2003. Assessing the effect of climate change and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32 (4):283-286.
- Burguete, J., García Navarro, P., 2001. Efficient construction of high resolution TVD conservative schemes for equations with source terms. Application to shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 37(2), 209-248.
- Chow VT., 1959, *Open channel hydraulics*, MacGraw-Hill Book Co. Inc.
- García-Ruiz J.M, Arnáez J., Beguería S., Seeger M., Martí-Bono C., Regüés D., Lana-Renault N., White S., 2005. Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena* 59:79-92.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Martí-Bono, C., Beguería, S., Latron, J., Nadal, E., Serrano, P., García-Ruiz, J.M., 2007a. Temporal variability in the relationships between precipitation, discharge and suspended sediment concentration in a Mediterranean mountain catchment. *Nordic Hydrology*, 38 (2): 139-150.
- Lana-Renault, N., Latron, J., Regüés, D., 2007b. Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 347: 497-507.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Nadal-Romero, E., Serrano Muela, P., García-Ruiz, J.M., 2010. Streamflow response and sediment yield after farmland abandonment: results from a small experimental catchment in the central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 165:97-114.
- Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat-Prats, J.M., 2005. Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central pyrenees. *Applied Geography*, 25: 47-65.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2006. Trends in high flows in the Central Spanish Pyrenees: Response to climatic factors or to land use change? *Hydrological Sciences Journal* 51:1039-1050.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J.M., 2010. Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountains of Duero River basin (Central Spain). *Global and Planetary Change* 72:39-49.