

RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO ISÁBENA (HUESCA) A LOS CAMBIOS EN LA VEGETACIÓN Y LOS USOS DEL SUELO EN LA DÉCADA DE LOS NOVENTA

Joan M. VERDÚ ARNAL¹
José A. MARTÍNEZ-CASASNOVAS¹
Núria GARCÍA HERNÁNDEZ¹

RESUMEN.— El presente trabajo analiza la respuesta hidrológica del río Isábena (Huesca) como consecuencia de los cambios en la vegetación y en los usos del suelo producidos en la década de 1990. La investigación comprende tres partes: el análisis de la distribución y de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca, el análisis de cambios temporales en la vegetación y en los usos del suelo mediante la utilización de imágenes de satélite y sistemas de información geográfica, y el análisis de la influencia de estos factores en la respuesta hidrológica de la cuenca. Como principales resultados de la investigación, en primer lugar, se han ajustado polinomios (R^2 de 0,7 a 0,9), que explican de forma integrada o puntual la variabilidad de la precipitación a partir de una a tres estaciones de referencia determinadas. Por otra parte, los cambios en la vegetación y usos del suelo han afectado a un 6,4% de la cuenca. Las áreas de evolución regresiva (erosión) representan solo un 2,4%, pero su efecto en la respuesta hidrológica, sin entrar en el aporte de sedimentos, hace que la mayor parte de subcuencas aumenten su caudal punta (hasta un 35%) y volumen de escorrentía estimado.

¹ Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. Av. Rovira Roure, 191. E-25198 LLEIDA. j.martinez@macs.udl.es; jmverdu@gencat.net

ABSTRACT.— *Hydrological response of the basin of Isábena river (Huesca) to the changes in vegetation and in the use of the soil in the nineties.* This work analyses the hydrological response of the Isabena river (Huesca) as a result of the changes in vegetation and in the uses of the soil, occurred in the decade of 1990. The research is comprised of three parts: the analysis of the distribution and variability of the rainfall in the basin, the analysis of temporary changes in the vegetation and in the uses of the soil using satellite images and geographic information systems, and the analysis of the influence of these factors on the hydrological response of the basin. Firstly, as main results of the research, polynomials have been set (R^2 from 0.7 to 0.9), which explain in an integrated and punctual way the variability of the rainfall based on one to three specific reference stations. On the other hand, the changes in vegetation and uses of the soil have affected 6.5% of the basin. The regressive evolution areas (erosion) only represent 2.4% but its effect on the hydrological response, not entering into the sediments filling, makes the majority of the sub-basins increase their peak flow (up to 35) and estimated run-off volume.

KEY WORDS.— Hydrological response, changes in vegetation, land use, Isábena river, Huesca, Spain.

INTRODUCCIÓN

La dinámica fluvial y los riesgos hidrológicos y geomorfológicos que se derivan de ella constituyen serios problemas medioambientales y socioeconómicos que se deben afrontar de manera permanente en un gran número de cuencas en el entorno mediterráneo de Europa (BURLANDO *et al.*, 1997). En esta área, un gran número de cuencas fluviales tienen cursos de agua semipermanentes o efímeros, pero también importantes crecidas ocasionales asociadas a lluvias torrenciales, que resultan catastróficas sin una adecuada planificación y ordenación del territorio. Pese a ello, actualmente aún existe una carencia importante de información sobre la dinámica fluvial de los cursos de agua asociada a crecidas y, sobre todo, una carencia de metodologías (basadas en parámetros físicos) calibradas para su elaboración, lo cual dificulta la planificación y gestión del dominio público hidráulico.

El río Isábena (Ribagorza, Huesca), con una cuenca de unos 450 km² de superficie, representa uno de los principales aportes de caudal y sedimentos al embalse de Joaquín Costa (Barasona). Estudios recientes (MARTÍNEZ-CASASNOVAS y POCH, 1998), han permitido estimar el aporte medio anual de sedimentos de los ríos Ésera e Isábena a este embalse, cuantificándose

en más de 0,5 hm³, lo cual pone de manifiesto los importantes problemas de erosión que sufren los suelos de estas cuencas y la urgente necesidad de medidas de control de la erosión.

Sobre la respuesta hidrológica del río Isábena, existen escasos antecedentes, ya sea de estudios de toda la cuenca o bien sobre la contribución de sus diferentes subcuencas. Una primera aproximación puede obtenerse mediante la modelización hidrológica, a través de datos como series hidrometeorológicas (precipitación y caudales), topografía, tipos de suelo y distribución de vegetación y tipos de usos del suelo. Este último parámetro permite la simulación de escenarios cambiantes, pudiendo analizarse la evolución de la respuesta hidrológica de acuerdo con los cambios temporales en la utilización del suelo.

Los modelos hidrológicos de uso más extendido y contrastado son los desarrollados en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Los estudios piloto de crecidas realizados a nivel nacional han venido usando el modelo hidrológico HEC-1 en la cuenca (actualmente HEC-HMS, Hydrological Modelling System, en entorno Windows). Este modelo se basa en el método del número de curva del Soil Conservation Service (SCS, 1972).

En España, la utilización conjunta de modelos hidrológicos e hidráulicos y sistemas de información geográfica (SIG) ha sido desarrollada en trabajos recientes (LAIN HUERTA, 1999). Uno de los ejemplos más significativos es la creación de un SIG hidrológico (CEDEX, 1994a, 1994b), con coberturas de trazado de cuencas, estaciones de aforo, estaciones meteorológicas, suelos y usos de suelo, entre otras. Otros trabajos han sido dirigidos a la obtención de parámetros de cara a la modelización, como por ejemplo, la derivación del parámetro número de curva a partir de un modelo digital de elevaciones y de coberturas digitalizadas de usos del suelo (FERRER *et al.*, 1995).

La aplicación de los modelos hidrológicos en cuencas fluviales cuenta, sin embargo, con el hándicap de la entrada del parámetro de precipitación. Precisamente, este es el caso de la cuenca del Isábena, dada la escasez de estaciones meteorológicas que, aparte de no tener una distribución homogénea en el espacio, tienen registros deficientes (periodos de tiempo cortos y/o con falta de datos). Existen, no obstante, estudios de estimación de precipi-

tación anual en la zona (DEL VALLE, 1997), pero siempre se trata de medias anuales, basadas en series de estaciones pluviométricas exteriores a la zona.

En este sentido, uno de los objetivos del presente trabajo se centra en caracterizar la distribución y variabilidad de las precipitaciones en la cuenca del Isábena, tanto en la subcuenca como en el resto de la cuenca, lo cual constituye uno de los aspectos fundamentales que determinan la dinámica fluvial de la cuenca. También se analizan los cambios multitemporales en la vegetación y los usos del suelo habidos en la cuenca del Isábena en la década de 1990, a partir de la utilización de imágenes de satélite y sistemas de información geográfica (SIG); y se modeliza la respuesta hidrológica de la cuenca y subcuencas según el efecto de los cambios en la vegetación y usos del suelo producidos en esta década y para episodios de diseño de diferente periodo de retorno.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Isábena se localiza en el extremo nororiental de la provincia de Huesca y forma parte del conjunto hidrológico de la cuenca del Ebro. Aun manteniendo unas características plenamente pirenaicas (nace en el Collado de la Corva, a 2.500 m, entre los picos Gallinero y la Tuca de Urmella) el río sufre un régimen pluvionival con gran irregularidad interanual, que se traduce en grandes variaciones en su cauce.

En cuanto al clima, el área de estudio puede subdividirse en dos grandes mitades, una al sur del macizo del Turbón, más cálida y seca, de clima mediterráneo seco, y otra al norte, típicamente pirenaica, con las características climáticas propias de la vertiente sur de los Pirineos. La temperatura media anual se encuentra entre 11 y 14 °C en la mitad sur, y entre 9 y 11 °C en la zona norte. La precipitación media que se registra en la cuenca varía entre los 450 y los 1.300 mm, dependiendo de la localización geográfica. La lluvia media anual de la cuenca es de 767 mm.

La ribera del río Isábena une dos sectores diferenciados morfoestructuralmente. En la margen derecha está la depresión intra-prepirenaica, formada por la Vall de Lierp y el corredor de Merli unidas mediante la sierra del Jordal (o Chordal). En la margen izquierda está la sierra de Sis, que forma el límite oriental de la cuenca. Frecuentemente, en la parte central de la

cuenca, el paisaje está dominado por la presencia de *badlands*, que generan importantes cantidades de sedimentos durante las lluvias torrenciales.

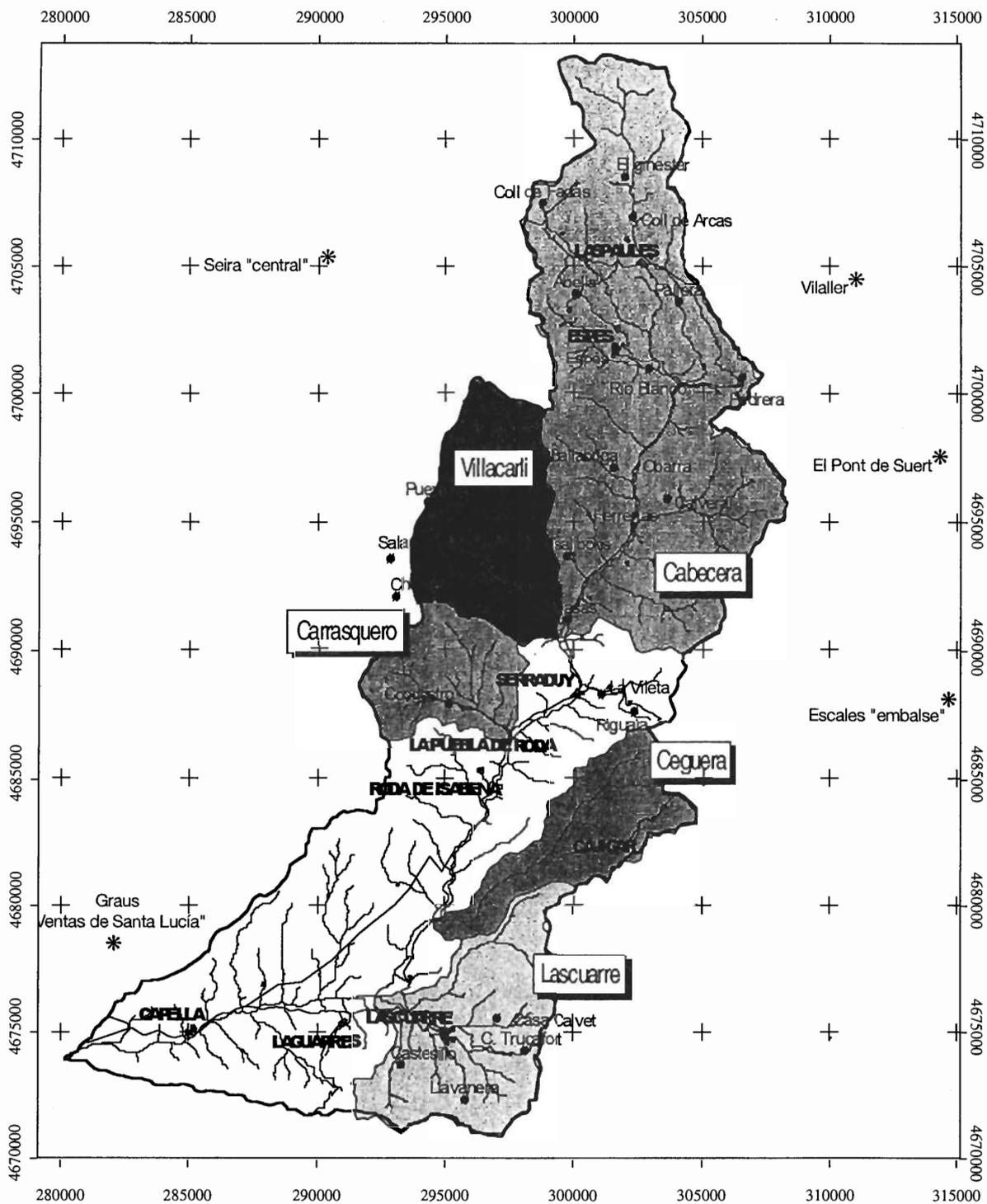
En relación con la vegetación, el bosque natural, que como clímax cubriría la mayor parte de la zona sur y centro de la cuenca, sería el carrascal, representado por la carrasca (*Quercus ilex* ssp. *ballota*). Actualmente tiene una extensión reducida y dispersa, dejando paso a formas de vegetación más degradadas como matorrales y pastizales secos. En la zona norte de la cuenca domina el *Pinus sylvestris*. A partir de 1.600 m aparece el *Pinus uncinata*, hasta los 2.300 m, donde ya se encuentra de forma dispersa. Los bosques caducifolios están representados por robles, sobre todo *Quercus faginea*, *Betula pendula* y *Fraxinus* sp. En toda la cuenca aparecen también diversas comunidades pratenses. La actividad agrícola más extensiva se localiza al sur de la cuenca. Los principales cultivos son los herbáceos de secano (cebada, trigo y girasol), así como cultivos permanentes: almendros y olivos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Distribución y variabilidad de las precipitaciones

La obtención de datos de precipitación se centró en las cinco subcuencas principales del Isábena (de norte a sur): cabecera de la cuenca, arroyo de Villacarli, Carrasquero, Ceguera y Lascuarre. Se instalaron 26 pluviómetros totalizadores a diferentes altitudes y orientaciones: 16 en la cuenca de cabecera, cinco en la del arroyo de Villacarli, dos en la de Ceguera, uno en la de Carrasquero y cuatro en la de Lascuarre (Fig. 1). La toma de datos en los 26 pluviómetros se llevó a cabo entre octubre del 2000 y octubre del 2001, con una duración total de 11 meses.

Para caracterizar la variabilidad espacial de las precipitaciones se planteó un análisis multivariante mediante regresión lineal por el procedimiento *step-wise* (paso a paso) (SAS INSTITUTE, 1992) con el fin de relacionar los datos de lluvia con la longitud (coordenada X), la latitud (coordenada Y) y la altitud. El programa estadístico utilizado fue el SAS 8.0©. Por otra parte, con el objeto de predecir la precipitación en cualquier punto de la cuenca, se plantearon regresiones múltiples teniendo como variables explicativas disponibles las coordenadas (X, Y, Z), así como los datos obtenidos en estaciones pluviométricas de referencia. Para determinar las estaciones más significativas, se llevó



Escala gráfica 1:200.000 - Sistema de georreferenciación UTM 31-N.
 Mapa obtenido a partir del modelo digital de terreno de 100 m de resolución de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Fig. 1. Área de estudio y localización de las subcuencas y estaciones meteorológicas en la cuenca del río Isábena.

a cabo previamente un análisis de agrupamiento en clases homogéneas (*clustering*) mediante el método de *K-means* (KAUFMAN y ROUSSEEUW, 1990). Este método permite definir a priori el número de grupos que se pretende hallar.

Cambios en la vegetación y en los usos del suelo en la década de 1990

Este análisis se llevó a cabo a partir de la interpretación de imágenes de satélite de resolución media, útiles para estudios de planificación regional y de reconocimiento (PORTA *et al.*, 1999). Las imágenes utilizadas fueron una escena del sensor Landsat-5 TM, de fecha 28/07/1993 y una escena del sensor Landsat-7 ETM+, de fecha 16/09/1999, con una resolución espacial de 30 m por píxel en ambas imágenes. Para la interpretación de las imágenes se tuvo en cuenta una leyenda adaptada a las necesidades de la modelización hidrológica a llevar a cabo en el estudio (Tabla I).

Los mapas de vegetación y usos del suelo para los años 1993 y 1999 se digitalizaron en formato vectorial topológico mediante el programa Cartalinx (Clark Labs). Ambas coberturas se analizaron utilizando los sistemas de información geográfica ArcInfo y ArcView GIS (ESRI).

Respuesta hidrológica de las subcuencas y de la cuenca

Para el cálculo de los caudales pico de crecida esperables para diferentes periodos de retorno, se optó por la aplicación de métodos hidrometeorológicos, concretamente el método del hidrograma unitario del Soil Conservation Service (SCS, 1972). Este modelo simula el proceso precipitación-escorrentía en base a parámetros pluviométricos, topográficos y de usos del suelo. La precipitación se introduce como un parámetro distribuido en el tiempo, lo cual permite modelizar no solo el caudal punta, sino también el hidrograma de salida.

Para poder establecer los grupos hidrológicos de los suelos de la cuenca, necesarios para el cálculo del número de curva, se llevaron a cabo infiltrometrías en campo, dos por cada clase de vegetación / uso del suelo. De esta forma, el grupo hidrológico asignado a cada unidad se basó en pará-

Tabla I. Leyenda de los mapas de vegetación y usos de la cuenca del Isábena, y números de curva.

Clase	Descripción
Bosque denso	Fracción cabida cubierta aproximadamente del 70% o mayor. Principalmente especies pináceas: <i>Pinus nigra</i> ssp. <i>salzmannii</i> en la parte baja de la cuenca, <i>Pinus sylvestris</i> en la parte media y alta de la cuenca y <i>Pinus uncinata</i> . Por encima de los 1.500 metros se encuentran bosques densos de caducifolios como hayas (<i>Fagus sylvatica</i>) y quejigos (<i>Quercus faginea</i>). [Número de Curva = 30.]
Bosque poco denso (zona húmeda; zona semiárida)	Fracción cabida cubierta menor del 70%, con mayor heterogeneidad que la clase anterior. Especies: quejigo (<i>Quercus faginea</i>), encina (<i>Quercus ilex</i> ssp. <i>ilex</i>) y pino laricio (<i>Pinus halepensis</i>). [Número de Curva = 55 (en zona húmeda) y 41 (en zona semiárida).]
Matorral con arbolado disperso	Matorral poblado por especies de talla media/baja como el enebro (<i>Juniperus communis</i>), el tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) o el romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>). Se encuentran pies de encina o quejigo irregularmente dispersos. [Número de Curva = 56.]
Prados de alta montaña	Prados supraforestales en el estadio alpino. Se encuentran en la zona del Gallinero y del Turbón. [Número de Curva = 61.]
Campos en fondo de valle	Terrenos agrícolas situados en terrenos de escasa pendiente, sembrados principalmente con cereal de invierno y girasol. [Número de Curva = 81 / 73.]
<i>Badlands</i>	Terrenos fuertemente erosionados. Principalmente afloramientos de margas grises que se localizan mayoritariamente a lo largo del arroyo de Villacarli. [Número de Curva = 93.]
Campos en vertiente	Terrenos agrícolas con pendiente longitudinal y/o transversal de cierta importancia, sembrados con cereal de invierno y girasol. [Número de Curva = 63.]
Afloramientos rocosos	Afloramientos rocosos, sin desarrollo posible de vegetación. [Número de Curva = 98.]
Matorral muy degradado	Matorral escasamente poblado, por especies de talla baja, como aliagas (<i>Genista scorpius</i>), romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), etc., que cubren pobremente el suelo. [Número de Curva = 77.]

metros reales medidos en campo, y, por lo tanto, se pudo ajustar mejor en la elección del número de curva asignado a cada clase de uso del suelo o vegetación (Tabla I).

Para la modelización hidrológica de la cuenca y subcuencas se utilizó el modelo hidrológico HEC-1. Se consideraron cuatro periodos de retorno (50, 100, 200 y 500 años), y dos escenarios de vegetación y usos del suelo (años 1993 y 1999). Se ponderó un número de curva medio, para toda la cuenca y para las cinco subcuencas de estudio, según las

superficies relativas de cada clase de vegetación y uso del suelo. Con estos datos se calculó el hietograma de lluvia neta a partir del hietograma de lluvia de diseño. A continuación, se calculó el hidrograma unitario de la cuenca, es decir, el hidrograma resultante de una precipitación neta de 1 mm, según el método del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service (SCS, 1972). Finalmente, se obtuvo (por multiplicación en cada intervalo de lluvia neta y agregación final) el hidrograma de cálculo resultante para cada subcuenca vertiente y cada periodo de retorno (que lleva asociado un determinado hietograma). Los datos de entrada citados se procesaron con el programa HEC-HMS (Hydrologic Modelling System).

RESULTADOS

En la tabla II figuran los resultados de campo obtenidos en cuanto a la precipitación, agrupados por subcuencas.

Tabla II. Precipitación (mm) registrada para cada episodio de lluvia y cada subcuenca, así como la media de todas las estaciones de la cuenca del Isábena.

Fecha	Isábena	Villacarli	Lascuarre	Ceguera	Cabecera	Carrasquero
14/04/00	62,2	47,0	20,5	28,8	88,6	31,6
29/04/00	106,3	104,3	71,3	85,6	122,6	102,6
14/05/00	100,4	104,0	76,9	83,9	109,2	89,5
29/05/00	69,3	76,1	36,8	52,1	78,9	62,6
15/06/00	103,9	119,4	85,7	99,9	110,7	101,6
07/10/00	106,9	108,1	83,7	99,5	116,7	94,9
20/10/00	30,7	33,1	16,6	25,0	37,3	25,1
28/10/00	42,6	40,9	42,7	44,6	42,9	42,2
11/11/00	73,9	79,2	46,5	58,5	83,8	67,2
16/12/00	135,2	125,5	65,2	103,0	164,4	124,0
15/03/01	9,5	9,9	5,7	8,8	10,1	12,8
26/04/01	24,8	20,5	10,4	13,3	33,2	15,9
17/05/01	150,3	151,8	110,5	131,4	162,3	149,9
27/05/01	66,2	151,8	110,5	131,4	162,3	149,9
29/06/01	67,6	60,8	28,6	53,3	80,5	66,5
02/10/01	110,5	124,2	46,7	79,9	129,2	93,9
Total	1.260,3	1.356,6	858,2	1.098,9	1.532,6	1.230,2

En la tabla III figuran los resultados de las regresiones para estimar la precipitación en la subcuenca a partir de las estaciones de referencia.

Tabla III. Resultados de las regresiones lineales para estimar la precipitación en las diferentes subcuencas del Isábena.

Subcuenca	Estaciones seleccionadas	Ecuación	R ²
Cabecera del Isábena	Coll de Fadas (C)	$P = 0,8976C + 6,3833$	0,9194
Arroyo Villacarli (Turbón)	Coll de Fadas (C), Torre la Ribera (T), Espés (E)	$P = 0,7813C + 0,5623T - 0,4353E + 3,92852$	0,9178
Arroyo Villacarli (Turbón)	Visalibons (V)	$P = 0,8722V + 6,8683$	0,8047
Carrasquero	Congustro (CG)	$P = 0,8903CG + 14,9318$	0,7039
Ceguera	Casiasas (CS)	$P = 0,7757CS + 8,8676$	0,7343
Lascuarre	Sala (S)	$P = 0,6695S + 9,0779$	0,6929

En la tabla IV se resumen las superficies y porcentajes de ocupación de cada una de las clases identificadas para cada año.

Tabla IV. Superficies de las clases de vegetación y usos del suelo en los años 1993 y 1999.

Clase	Superficie (km ²)		Superficie (km ²)	
	1993	%	1999	%
Bosque denso	55,59	12,6	47,80	10,8
Bosque poco denso (zona húmeda)	49,22	11,2	42,89	9,7
Bosque poco denso (zona semiárida)	68,91	15,6	72,96	16,5
Matorral con arbolado disperso	81,34	18,4	85,50	19,4
Prados de alta montaña	21,48	4,9	21,63	4,9
Campos de fondo de valle	62,17	14,1	61,55	14,0
<i>Badlands</i>	1,36	0,3	1,72	0,4
Campos en vertiente	65,57	14,9	65,75	14,9
Afloramientos rocosos	29,85	6,8	36,79	8,3
Matorral muy degradado	5,54	1,3	4,40	1,0

La tabla V resume los resultados del proceso de modelización hidrológica llevado a cabo.

Tabla V. Parámetros hidrológicos calculados para la cuenca y las subcuencas del río Isábena en los años 1993 y 1999, para diferentes periodos de retorno (T) y considerando un intervalo de cálculo de 15 min.

Subcuenca y área de drenaje	T (años)	Caudal pico (m ³ /s)		Tiempo al pico (horas)		Volumen total (miles de m ³)	
		1993	1999	1993	1999	1993	1999
Villacarli (41 km ²)	50	61,6	86,3	4:00	4:00	436,67	606,19
	100	85,6	114,7	4:00	4:00	607,28	773,25
	200	110,9	144,3	4:00	4:00	764,32	953,27
	500	136,8	174,3	4:00	4:00	933,38	1.144,7
Lascuarre (44 km ²)	50	5,7	3,0	5:00	5:15	40,782	18,473
	100	10,8	6,1	4:30	4:45	84,338	49,765
	200	17,3	11,2	4:30	4:30	141,5	94,675
	500	27,5	18,7	4:15	4:30	223,74	162,73
Ceguera (28 km ²)	50	11,7	14,1	4:45	3:30	114,52	134,32
	100	21,8	25,0	4:45	4:00	206,77	232,82
	200	30,9	35,3	4:30	4:30	276,56	307,76
	500	45,8	51,3	4:30	4:30	401,46	439,35
Carrasquero (24 km ²)	50	8,4	10,9	4:00	4:00	61,832	77,283
	100	13,2	16,5	4:00	3:45	94,081	113,81
	200	21,2	25,4	4:00	3:45	152,97	179,32
	500	32,9	39,5	3:45	3:45	214,97	247,34
Cabecera (146 km ²)	50	26,4	31,4	6:15	6:15	408,526	470,94
	100	41,1	56,0	6:15	6:00	615,93	803,75
	200	66,2	75,3	6:00	5:45	942,004	1.045,6
	500	106,7	114,4	5:45	5:45	1.428,024	1.511,9
Cuenca	50	28,6	33,8	36:45	36:45	1.639,5	2.012,8
	100	39,6	45,9	36:45	36:45	2.334,6	2.532,6
	200	67,0	75,6	36:45	36:45	3.504,8	3.798,8

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Distribución y variabilidad de la precipitación

La precipitación total en el periodo de estudio ascendió a 1.260 mm, como media de todas las estaciones pluviométricas. Las cuencas más húmedas fueron la cabecera del Isábena y la del arroyo de Villacarli (Turbón), con más de 1.300 mm en ambas. La menos lluviosa fue la de Lascurarre, con poco más de 800 mm (Tabla II). Estos datos indican un gradiente norte-sur bastante claro en los datos globales, con una precipitación en el norte de la cuenca que prácticamente dobla la de su parte sur. Este gradiente norte-sur se repite si se consideran los episodios registrados por separado. El único que resultó prácticamente homogéneo por toda la cuenca fue el registrado el 28/10/2000, con unos 40 mm.

El resultado del análisis de agrupamiento (*clustering*) para relacionar las estaciones pluviométricas, indica que las estaciones se pueden agrupar en tres grupos. El primero, el de la zona norte, más lluviosa, agrupa las estaciones de la cabecera, más la del Turbón; el segundo agrupa el resto de las estaciones de la subcuenca de Villacarli, más las del tramo medio del Isábena; el tercero agrupa las estaciones de más al sur, las de la subcuenca de Lascurarre. Esto pone de manifiesto la importancia de mantener una red pluviométrica bien distribuida por toda la cuenca, siendo necesarias como mínimo tres estaciones para caracterizar la variabilidad de la cuenca.

El análisis multivariante mediante regresión lineal por el procedimiento *stepwise*, para relacionar los datos de lluvia con la longitud (coordenada X), la latitud (coordenada Y) y la altitud, dio como resultado un polinomio lineal: $P (\%) = 0,00137 X + 0,00184 Y - 8936,31$, $R^2 = 0,41$, donde P es el porcentaje de variación respecto del valor medio de precipitación de toda la cuenca (al cual se le asigna un valor de 100%). Se observa que el modelo ajustado solo explica en un 40% la variabilidad espacial de la precipitación. La variable Y es la más explicativa, con un coeficiente de 0,00184 que implica, como promedio, que cada 1.000 m hacia el norte de la cuenca que nos desplazamos, se produce un aumento de un 1,84% en la precipitación (respecto de la precipitación media caída en la cuenca). Cabe destacar la ausencia del parámetro altitud (Z) en el polinomio, lo cual significa que en la cuenca las variaciones entre valles, especialmente la variación norte-sur, son las que explican en mayor medida las variaciones de lluvia.

En cuanto al análisis predictivo de la precipitación en la cuenca, a partir de los datos de las estaciones de referencia representativas de las zonas pluviométricas (Espés para la zona norte, Congustro para la zona media y Casa Calvet para la zona sur), dio como resultado un polinomio que permite estimar la precipitación en cualquier lugar de la cuenca y que recoge un 80% de la variabilidad de la misma (ecuación 1):

$$P(\text{mm}) = 8.16 \cdot 10^{-4} \cdot X(\text{m}) + 1.46 \cdot 10^{-3} \cdot Y(\text{m}) + 0.33860 \cdot P_{(\text{Congustro})}(\text{mm}) + 0.35453 \cdot P_{(\text{Espés})}(\text{mm}) + 0.41279 \cdot P_{(\text{Casa Calvet})}(\text{mm})$$

Se observa que las variables que recogen mejor la variabilidad de la precipitación son el dato de precipitación de Congustro, así como el valor de latitud (Y).

También se dedujeron polinomios para estimar el valor integrado de precipitación en la subcuenca (Tabla III) a partir únicamente de datos de una estación, por el procedimiento *stepwise*. El grado de ajuste osciló entre el 90% (subcuenca de cabecera) y el 70% (subcuenca de Lascuarre). La disponibilidad de estos polinomios permite una estimación más ajustada de la precipitación dentro de la subcuenca de cara a la modelización de su respuesta hidrológica.

Cambios en la vegetación y usos del suelo en la década de los noventa

A la vista de los diferentes tipos de cambios observados (Tabla IV), y atendiendo a su tipología y carácter, se establecieron los siguientes grupos:

— *Áreas de evolución progresiva* (superficie 5,71 km², 1,3% de la superficie de la cuenca): son zonas progresivas o reconstructivas, hacia comunidades vegetales cada vez más complejas y de mayor biomasa (CONESA, 1997). Este tipo de cambios se localizan en la zona alta de la cuenca (al sur de la cordillera del pico Gallinero y el pico de Basibé), la zona de la sierra de Ballabriga y en zonas puntuales de la subcuenca del arroyo de Carrasquero.

— *Áreas de evolución regresiva* (superficie 10,64 km², 2,4% de la superficie de la cuenca): son zonas que evolucionan hacia comunidades más simples, es decir, hacia etapas menos maduras, dado que se alejan de la vegetación

potencial o clímax (CONESA, 1997). Se localizan en la zona alta del arroyo de Villacarli, la zona sudeste de la subcuenca de la cabecera del Isábena entre Beranuy y Pardinella, la zona baja del barranco de La Ceguera y en la zona más alta de la cuenca al sur del pico de Basibé y del pico de la Montaña de las Casas. En estas zonas destacan los lugares con aparición de procesos erosivos, evolución de zonas de bosque poco denso hacia matorrales, paso de matorrales degradados a zonas de afloramiento del manto de alteración en superficie.

— *Áreas de nuevos cultivos* (superficie 3,31 km², 0,7% de la superficie de la cuenca): se trata de zonas donde no existían cultivos en el año 1993, y sí que aparecen en el 1999. Estas zonas se localizan en la subcuenca de Lascuarre, también entre las localidades de Beranuy y Calvera y de forma esporádica en la parte media de la cuenca.

— *Áreas de abandono de cultivos* (superficie 8,56 km², 1,9% de la superficie de la cuenca): se trata de zonas de cultivo que han pasado a otro tipo de uso.

La superficie afectada por cambios es pequeña, unos 28 km² del total de la cuenca. El 93,6% de la cuenca no ha sufrido cambios apreciables. Los cambios más importantes son los de carácter de evolución regresiva de la vegetación natural. El siguiente más importante es el abandono de cultivos. La clase de evolución regresiva incluye la aparición de nuevas zonas de *badlands* y las degradaciones de las zonas de matorral. Estas áreas tienen su mayor influencia en la alteración de los parámetros hidrológicos de la cuenca y se considera el parámetro que más influencia puede tener en el aumento de la escorrentía que se da en la cuenca del río Isábena. Estos resultados son acordes con los obtenidos por otros autores en la misma zona de estudio (PENELLA, 1997; VALERO-GARCÉS *et al.*, 1997; MARTÍNEZ-CASASNOVAS y POCH, 1998), y ponen de manifiesto la necesidad y urgencia del establecimiento de medidas de control de la erosión, particularmente en la zona central de la cuenca del Isábena.

Respuesta hidrológica de la cuenca y subcuencas del río Isábena

Los resultados obtenidos (Tabla V) permiten hacer referencia a aspectos como la contribución de las diferentes subcuencas al caudal global del río Isábena, los tiempos al pico de las crecidas, la dinámica global de la cuenca y las repercusiones de los cambios en la vegetación y los usos del suelo en la década analizada de 1990.

Con relación al aporte global en volumen, la contribución más importante corresponde a las subcuencas de Villacarli y la cabecera, con un 26% cada una (respecto el total de la cuenca) para un episodio de 100 años de periodo de retorno. Por el contrario, las subcuencas del tramo medio e inferior de la cuenca aportan entre un 5 y un 10%.

El tiempo al pico es del orden de las 4 h para todas las subcuencas, excepto para la cabecera, que es de unas 6 h. Esto, junto con el escaso aporte de las subcuencas del sur, indica que el caudal punta en la cuenca, es decir, la onda principal de avenida, se genera al confluir la subcuenca de cabecera con la de Villacarli. Así, suponiendo un episodio de lluvia homogénea, el volumen generado en dichas subcuencas y la coincidencia en el tiempo (desfase de 1 h) de sus picos de caudal hace que a partir de la confluencia Villacarli-cabecera se genere un pico de caudal que, al ir transitando aguas abajo, irá marcando el nivel máximo de avenida para ese episodio.

Sobre la dinámica global de la cuenca, la modelización integrada de toda la cuenca se ha revelado como poco precisa, puesto que estima caudales pico ($45 \text{ m}^3/\text{s}$ para $T=100$ años) muy inferiores a las avenidas históricas registradas ($320 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1963), e incluso inferiores a los caudales pico correspondientes a sus propias subcuencas ($85 \text{ m}^3/\text{s}$ en la de Villacarli en 1993). El tiempo al pico, de más de 36 h, tampoco resulta muy fiable según estimaciones de campo. Estos resultados ponen de manifiesto que es necesario abordar el estudio de la cuenca con modelos más distribuidos, o bien enlazando modelizaciones de subcuencas mediante tránsito de caudales.

Respecto a la evolución de la dinámica hidrológica, relacionada con los cambios de usos del suelo en el periodo estudiado, el factor determinante es la progresión o la regresión en cuanto a la vegetación de cada subcuenca. Subcuencas en que el proceso predominante es la degradación de la vegetación (aumento de la superficie de *badlands*, por ejemplo), han visto aumentado tanto su caudal pico como su volumen de escorrentía (subcuencas de cabecera, Villacarli, Ceguera y Congustro). El caso más extremo es el de la cuenca de Villacarli, con un aumento del 35% en cuanto al caudal pico previsto (de 85 a $115 \text{ m}^3/\text{s}$). Subcuencas en que ha predominado la progresión en la colonización por parte de la vegetación, cosa que favorece la infiltración, han visto disminuido tanto el caudal pico como el volumen escurrido; es el caso de Lascuarre, con una disminución del 40% en el caudal pico (de 10 a $6 \text{ m}^3/\text{s}$).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURLANDO, P.; MANCINI, M., y ROSSO, R. (1997). Impact of climate change on Hydrological modelling and flood risk assessment. En CASALE, R.; HAVNØ, K., y SAMUELS, P. (eds.). *RIBAMOD, River basin modelling management and flood mitigation*. EU Commission, IV EU Programme on Environment and Climate. Proceedings of the First Expert Meeting. Brussels.
- CEDEX (1994a). *Curso sobre utilización de los SIG en Hidrología*. Centro de Estudios y Experimentación. Madrid.
- CEDEX (1994b). Utilización de modelos de simulación continua en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en cuencas experimentales. *Informe parcial núm. 2: Los SIG y su aplicación a la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación. Madrid.
- CONESA, J. A. (1997). *Tipologia de la vegetació: Anàlisi i caracterització*. Edicions de la Universitat de Lleida. Col·lecció Eines. Lleida. 250 pp.
- DEL VALLE, J. (1997). La precipitación media anual en el sector alto de la cuenca del Cinca. *Pirineos*, 149-150: 121-144.
- FERRER, M.; RODRÍGUEZ, J., y ESTRELA, T. (1995). Generación automática del número curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del Agua*, 2: 43-58.
- KAUFMAN, L., y ROUSSEEUW, P. J. (1990). *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. John Wiley. Nueva York.
- LAÍN HUERTA, L. (ed.) (1999). *Los Sistemas de Información Geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*. ITGE. Madrid.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A., y POCH, R. M. (1998). Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse de Joaquín Costa. *Limnetica*, 14: 83-91.
- PENELLA, M. E. (1997). *Caracterización de badlands y análisis de su dinámica mediante estudio multitemporal de fotografías aéreas y SIG en Campo (Huesca)*. Proyecto Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida. Lleida.
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M., y ROQUERO, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2ª ed. Mundi Prensa. Madrid.
- SAS INSTITUTE (1992). *SAS/LAB Software: user's guide: version 6*. Cary. Nueva York.
- SCS (SOIL CONSERVATION SERVICE) (1972). *Hydrology Sec 4 of National Engineering Handbook*. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- VALERO-GARCÉS, B.; NAVAS, A., y MACHÍN, J. (1997). Sediment deposition in the Barasona reservoir (central Pyrenees, Spain): temporal and spatial variability of sediment yield and land use impacts. *Human Impact on Erosion and Sedimentation. IAHS Publ.*, 245: 241-249.