

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ISÁBENA (CUENCA DEL EBRO). I: VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

Joan M. Verdú¹, Ramon J. Batalla² y José A. Martínez-Casasnovas²

Resumen:

Este trabajo analiza la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Isábena (Cuenca del Ebro, Prepirineo aragonés) durante los años 2000 y 2001. También estudia los errores en la estimación de la precipitación según la fuente de datos y el tipo de interpolación. El estudio se realizó a partir de datos obtenidos mediante 26 pluviómetros totalizadores y 3 pluviógrafos registradores distribuidos en las distintas subcuencas. En la cabecera de la cuenca la precipitación anual fue mayor, pero en la parte media de la cuenca las tormentas fueron más intensas, y con un desfase temporal medio de -50 minutos. La precipitación por episodio siguió un gradiente positivo en sentido sur-norte (1,84% /km). Se presentan los polinomios derivados para estimar el valor integrado de precipitación para cada subcuenca a partir de un solo pluviómetro, con coeficientes de ajuste entre el 70% y el 90%. Asimismo se detectó una infraestimación media del 13% en la precipitación a partir de los pluviómetros de la red oficial I.N.M.. La estimación de la precipitación por subcuencas mediante el método de polígonos de Thiessen indica también un error medio por defecto del -15%. Los distintos errores son importantes, especialmente si los datos de precipitación se utilizan en rutinas de modelización hidrológica. No obstante, se pueden subsanar mediante el uso de polinomios de ajuste y con la instalación estratégica de pluviógrafos registradores.

Palabras clave: precipitación, variabilidad espacial y temporal, cuenca de montaña, río Isábena

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la distribución espacial y temporal de la precipitación es fundamental para la correcta caracterización de la respuesta hidrológica de una cuenca de drenaje. Aún así, son escasos los estudios sobre variabilidad de precipitación en cuencas de montaña en España, y especialmente en el Pirineo. Se trata de cuencas de gran interés para la correcta gestión de los recursos hídricos, ya que se encuentran en cabecera y generan la mayor parte de la aportación de las grandes cuencas. Algunos estudios han puesto de manifiesto la relación entre la distribución espacial de la lluvia y la altimetría (e.g. Llasat y Puigcerver, 1992), mostrando que existe un gradiente hipsométrico positivo sólo hasta cierta altura, llamada punto crítico de inversión, a partir de la cual el gradiente disminuye. Remenieras (1974) determinó una altitud

óptima pluvial de 2.000 m s.n.m. en los Pre-Alpes, con un gradiente medio de 1,5 mm/m. En la vertiente norte de los Pirineos el mismo autor estimó un gradiente de 1,2 mm/m entre 1.000 y 1.500 m s.n.m., de 0,5 mm/m entre 1.000 y 2.000 m s.n.m., y de 0,9 mm/m entre 2.000 y 2.500 m s.n.m. En la cuenca de Reynolds Creek (234 km², Idaho, US) Johnson y Hanson (1995) calcularon un gradiente de 0,6 mm/m entre 1.200 y 2.000 m s.n.m.. Sin embargo, otros estudios (e.g. Kieffer-Weisse y Bois, 2001) han mostrado que la altitud no es el único factor explicativo de la variabilidad de la precipitación, ya que en muchos casos también influyen la pendiente, la exposición, la orientación e incluso la distancia al mar. Spreen (1947) mostró que todos estos factores explicaban el 88% de variabilidad de la precipitación en Colorado (US) y que, de entre ellos, la altitud explicaba únicamente el 30%. En Japón, donde por la cercanía al mar el

¹Agència Catalana de l'Aigua, Provença, 204-208 08036 Barcelona. E-mail: jmverdú@gencat.net

²Departamento de Medio Ambiente y Ciencias de Suelo, Universidad de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure 191, 25198 Lleida. rbatalla@macs.udl.es, j.martinez@macs.udl.es

efecto Foehn es importante, a mayor exposición a los vientos dominantes, la precipitación registrada es también mayor (Oki et al., 1991; Tang-Chang et al., 1998). En Nueva Zelanda, Henderson y Thompson (1999) registraron un gradiente espacial de precipitación de +5,3% por km en los 20 km que separan la franja costera de la cordillera de los Alpes del Sur. Otro estudio en el Himalaya también puso de manifiesto un gradiente altitudinal y de orientación (Dhar y Battacharya, 1976). La heterogeneidad espacial de la precipitación también se ve influenciada por el tipo del evento lluvioso, como es el caso de las precipitaciones de tipo convectivo. Por ejemplo, Goodrich et al. (1995) encontraron variaciones de 0,28 a 2,48 mm por cada 100 m en horizontal, lo cual supone una variación del 4 al 14% cada 100 m respecto de la precipitación media.

Existen diversos métodos de estimación de la precipitación en zonas de montaña, como el de Spreen (1947) o Dugo et al. (1994), que tienen en cuenta los parámetros elevación, orientación y exposición, basándose en un ajuste estadístico de datos empíricos para una región determinada. Desurosne et al. (1991) encontraron en Francia correlaciones entre la precipitación en el fondo de los valles y la precipitación en la sierra. Andrieu et al. (1996) desarrollaron una metodología para tener en cuenta el efecto orográfico en la previsión de precipitación en la región mediterránea de Cévennes. Otros métodos se basan en técnicas de interpolación, como la media ponderada según la curva hipsométrica, el método de los polígonos de Thiessen, la ponderación por el inverso de la distancia, o por inverso del cuadrado de la distancia (e.g. Remenieras, 1974; Singh, 1976; Bras y Rodríguez-Iturbe, 1976; Dugo et al., 1994). Más recientemente, algunos métodos utilizan curvas de intensidad-duración-frecuencia a nivel de cuenca (Sivapalan y Blöschl, 1998), procedimientos geoestadísticos (Pardo-Iguzquiza, 1998; Gómez-Hernández et al., 2002) o bien el uso conjunto de redes de pluviógrafos junto con imágenes de radar meteorológico (López et al., 1989) o de satélite (Grimes et al., 1999).

En la línea de la estimación de la precipitación en zonas de montaña, este artículo presenta un estudio sobre la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Isábena (Cuenca del Ebro, Pre-Pirineo). Se trata de una extensa cuenca de montaña (420 km²) en la que la red oficial de pluviómetros del I.N.M. se compone de tres estaciones ubicadas en el fondo del valle,

y con una serie histórica de unos 10 años. La estimación de la precipitación media en la cuenca a partir de dichos pluviómetros conlleva, hipotéticamente, un error sistemático, ya que dicha red difícilmente recoge la variabilidad de la lluvia en una cuenca extensa y orográficamente compleja. En este contexto, los objetivos del estudio son: a) estudiar la distribución espacial de la precipitación en la cuenca y subcuencas del Isábena, así como los parámetros que más determinan dicha variabilidad, b) desarrollar un modelo de predicción que permita estimar la precipitación en las subcuencas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas que funcionan actualmente en la cuenca, y c) determinar el error en la estimación de la precipitación a partir de datos del I.N.M. e interpolando mediante polígonos Thiessen. El desarrollo de los modelos de interpolación de precipitaciones que se aborda en esta investigación puede ser también de gran utilidad en otras cuencas de similares características, en las que las redes oficiales de pluviómetros son insuficientes o no están correctamente situadas para abordar la correcta caracterización de la respuesta hidrológica de dichas cuencas de drenaje.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Isábena forma parte del conjunto hidrológico de la cuenca del Ebro (Figura 1). Aunque mantiene unas características plenamente pirenaicas el río presenta un régimen pluvionival con gran irregularidad interanual. Cuenta con una superficie de 450 km² (0,48 % del total de la cuenca del Ebro). El rango de altitudes oscila entre los 650 m s.n.m. en su desembocadura y los 2.720 m s.n.m. del Pico de Gallinero, en su extremo norte.

Esta cuenca se encuadra dentro del dominio climático mediterráneo, siendo la característica principal un gran contraste térmico, con un invierno seco y con gran insolación (entre los periodos de nevadas), y un verano más tormentoso, con gran número de lluvias de carácter torrencial. Desde el punto de vista climático, 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. A ello hay que añadir además la influencia altitudinal fruto del relieve, de manera que el clima pasa de tener carácter submediterráneo en la parte sur, a

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ISÁBENA (CUENCA DEL EBRO). I: VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

tener rasgos subalpinos a partir de 1.600 m. La precipitación media anual en la cuenca varía entre 600 y 1600 mm, siendo la lluvia media de la cuenca de 767 mm, con valores máximos mensuales de 75 a 90 mm en mayo y junio. Los mínimos de precipitación se producen en el mes de julio, con menos de 50 mm. Las precipitaciones de mayor intensidad ocurren en otoño y primavera, seguidas por las lluvias de verano e invierno.

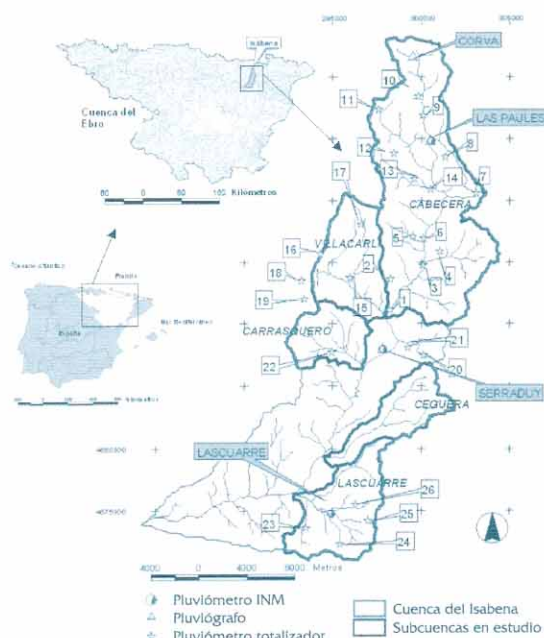


Figura 1. Mapa de localización de las subcuencas del río Isábena, con indicación de los pluviómetros del I.N.M. y de los pluviógrafos registradores pluviómetros totalizadores propios.

METODOLOGÍA

Obtención de datos pluviométricos

En este apartado se presenta el diseño instrumental llevado a cabo en la cuenca del Isábena para la obtención de datos de precipitación, así como para la estimación de los errores de medición.

Diseño instrumental

El estudio de la variabilidad espacial de la precipitación se basó en la medición de lluvia en las cinco subcuencas principales de la cuenca del Isábena (de norte a sur): Cabecera, Villacarli, Carrasquero, Ceguera y Lascuarre (Figura 1). En la zona norte, más escarpada y lluviosa, se densificó la red de pluviómetros. Se instalaron dos tipos de equipos de medición: pluviómetros totalizadores y pluviógrafos registradores automáticos. Los pluviómetros totalizadores se diseñaron según el modelo de la *Association Scientifique de France* (Remenieras, 1974). Constan de una entrada en cilindro más un embudo de un diámetro de 20 cm, a una altura de 1,5 m, y con un ángulo de visión mínimo de 45°. Una manguera conduce el agua del embudo a un bidón de 5 litros (enterrado bajo tierra para evitar la evaporación). Los pluviógrafos registradores fueron *Campbell Scientific* de balanceo, con una precisión de 0,2 mm/balaceo, junto con un registrador de datos *Campbell CR510*. En las subcuencas de Cabecera y Villacarli (parte media-alta de la cuenca) se instalaron 3 pluviógrafos registradores (Serraduy, Las Paúles y Corva). En el conjunto de las cuencas se instalaron además 26 pluviómetros totalizadores a diferentes altitudes y orientaciones: 16 en Cabecera, 5 en Villacarli, 2 en Ceguera, 1 en Carrasquero, y 4 en Lascuarre. La toma de datos se realizó entre Abril de 2000 y Abril de 2002 y se llevó a cabo en cinco periodos diferenciados, impuestos por pausas estivales debido a la ausencia de lluvias y al componente local de los fenómenos tormentosos, y por pausas invernales obligadas. No se utilizaron nivómetros debido a la escasez de recursos y la inaccesibilidad a los pluviómetros por la nieve. En la tabla 1 se presentan los meses en que los instrumentos fueron operativos, así como el número de eventos registrados.

Estimación del error de medida

Con el objetivo de comparar la precisión de la medida de precipitación de las tres fuentes de información que se manejan en el trabajo (pluvio-

Tabla 1. Periodos de operatividad, y número de tormentas >10 mm en los pluviógrafos automáticos de Serraduy, Las Paúles y Corva

	Año 2000												Año 2001												2002											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A								
Serraduy	-	-	-	-	4	2	1	1	3	3	4	-	-	-	0	1	2	0	3	0	4	1	1	0	0	0	2	5								
Las Paúles	-	-	-	-	-	1	0	0	4	3	1	-	-	-	-	2	5	-	-	-	-	1	0	-	-	0	2	5								
Corva	-	-	-	-	-	2	1	0	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									

grafos registradores, pluviómetros totalizadores, y pluviómetros del Instituto Nacional de Meteorología, I.N.M.), se instalaron un pluviómetro totalizador y un pluviógrafo registrador junto al pluviómetro oficial del I.N.M. en Serraduy, en la parte media de la cuenca. En primer lugar se contrastaron las tres fuentes de información integrando temporalmente los datos según los periodos de control del totalizador, con el fin de hacerlos comparables. Se compararon los eventos ocurridos entre Septiembre y Diciembre de 2001. En segundo lugar se contrastaron los datos del pluviómetro I.N.M con los datos del pluviógrafo automático con una resolución temporal diaria integrados en periodos diarios (8:00 a 8:00). De esta manera se compararon casi dos años de datos divididos en dos periodos: mayo a noviembre de 2000 y marzo a noviembre de 2001.

Análisis de la intensidad y la duración de los episodios de precipitación

A partir de los datos obtenidos en los tres pluviógrafos registradores se individualizaron los diferentes episodios de precipitación. Para episodios de magnitud superior a 10 mm se hizo un estudio de los respectivos hietogramas. Las variables del estudio comparativo entre pluviógrafos y para cada episodio fueron: Precipitación total, Duración total, Intensidad máxima en 15 minutos, Intensidad media, Desfase temporal del inicio de la precipitación, y Desfase temporal de la intensidad máxima.

Análisis de la distribución espacial de la precipitación

Para el análisis de la distribución espacial de la precipitación se usó la red de 26 totalizadores, ya que se trata de la fuente de datos con mayor densidad de puntos de muestreo. Ello implica que se trata de datos integrados en el tiempo (i.e. lluvia de un periodo de varios días) de los 18 eventos registrados durante el periodo de estudio. El objetivo era la búsqueda de patrones espaciales de variabilidad de la lluvia, es decir gradientes nortesur o este-oeste, y altitudinales. Para ello se realizó un análisis multivariante mediante regresión lineal por el procedimiento 'paso a paso' o *stepwise* (Esbensen *et al.*, 1996), que permitió relacionar los datos de lluvia con la longitud (coordenada X), la latitud (coordenada Y), y la altitud (coordenada Z) del punto de muestreo concreto. El criterio de entrada y salida de variables en la regresión fue el de un nivel de significación de 0,05. El software

estadístico utilizado fue SAS 8.0©. Para incluir los datos de los eventos de lluvia en un mismo polinomio de ajuste se transformaron los *mm* de lluvia en porcentaje de lluvia respecto a la media de cada episodio.

Estimación de la precipitación por subcuenca a partir de una sola estación de referencia

El objetivo de este análisis fue la obtención de la precipitación media para cuenca de estudio a partir de una única estación pluviométrica de referencia. Para ello, en primer lugar se integró la precipitación de manera areal, con el objeto de obtener un dato total a nivel de subcuenca. Se optó por el método de interpolación por el inverso de la distancia que en un estudio previo demostró ser el de mejor ajuste para los datos disponibles en la cuenca del Isábena (Valls, 2002), que comparó para el mismo conjunto de totalizadores el uso ajuste polinómico con altura, con coordenadas y altura, la triangulación con los tres totalizadores más próximos, el método del inverso de la distancia, y el inverso de la distancia al cuadrado.. Para cada episodio se generó una cobertura *raster* distribuida (pixel de 30 x 30 m), mediante el programa ArcView GIS 3.2 (©ESRI), con el dato de precipitación interpolado ponderando para cada punto las 10 estaciones vecinas por el inverso de la distancia. Se tomaron 10 vecinos como criterio conservador, ya que sólo alguna estación (totalizador) tenía dicho número de estaciones a una distancia similar (ver figura 1). Posteriormente, se superpuso una máscara de cada subcuenca con la cobertura interpolada de precipitación, y se dedujo la precipitación media para cada subcuenca y evento. Para determinar la estación totalizadora de referencia que permitiera estimar mejor el valor integrado de precipitación para cada subcuenca, se empleó una regresión lineal *stepwise*, cuyas variables explicativas fueron X, Y, Z y todos los pluviómetros totalizadores. La variable independiente en este caso era la precipitación integrada para cada subcuenca. La validación de los polinomios se hizo en base a los dos últimos episodios de precipitación registrados.

Comparación entre metodologías de estimación areal de precipitación

Los análisis realizados permitieron obtener, por una parte, un dato de precipitación medio por evento y subcuenca (que se supuso el más cercano a la realidad puesto que se basa en interpolación

por el método del inverso de la distancia de datos de una densa red de totalizadores) y, por otra, polinomios ajustados para encontrar un dato medio integrado por subcuencas (proceso realizado a partir de un dato puntual de un pluviómetro totalizador que mostró una buena correlación con la precipitación media de cada subcuenca). Posteriormente se compararon estos dos métodos con la metodología tradicional de los polígonos de Thiessen a partir de los datos de las estaciones del I.N.M. repartidas en la cuenca (Serraduy, Las Paúles y Lascuarre) (Figura 1). Para realizar este ejercicio se asumió que la metodología propuesta en la presente investigación determinó con mayor exactitud la precipitación integrada a nivel de cuenca y subcuenca, ya que se basa en una red de 26 totalizadores frente a 3 e incluye una interpolación (inverso de la distancia) más avanzada que el polígonos de Thiessen, con lo que la comparación de ambos métodos indicaría el error cometido en la estimación por el método tradicional, cuya fiabilidad está condicionada por la falta de pluviómetros en la zona. Este es un error de partida que repercute en cualquier estudio hidrológico que se derive de dicho dato.

Cabe admitir que para la interpolación areal de los 26 totalizadores se podría haber usado métodos geoestadísticos como el kriging, o incluso estimaciones a partir de radar meteorológico, pero estos no habían sido considerados en el estudio previo (Valls, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación registrada durante el periodo de estudio

La precipitación recogida en la cuenca del Isábena fue originada principalmente por frentes provenientes del oeste, salvo fenómenos tormentosos de tipo convectivo típicos del verano. Las situaciones de levante que habitualmente causan lluvias torrenciales en la costa mediterránea sólo produjeron precipitaciones débiles en la cuenca debido a la distancia que la separa de la costa. La precipitación total durante los dos años de estudio ascendió a 1.342 mm (valor medio de todas las estaciones pluviométricas, Figura 2). Las subcuencas más húmedas fueron la de Cabecera y la Villacarli con más de 1.400 mm. La menos lluviosa fue la de Lascuarre con poco más de 800 mm. Los datos globales muestran de entrada un claro gradiente norte-sur.

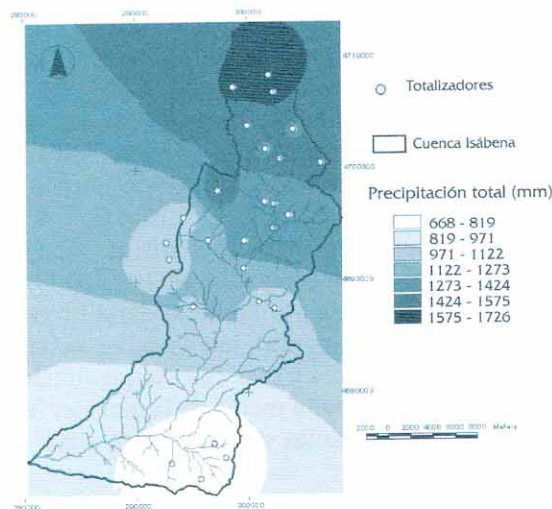


Figura 2. Precipitación total (mm) durante el periodo de funcionamiento de los totalizadores (2001-2002).

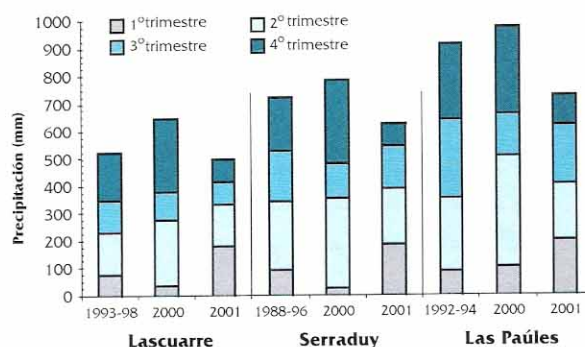


Figura 3. Comparación de precipitaciones trimestrales (años 2000-2001) con la medias de las series históricas, para las estaciones del I.N.M. de Lascuarre, Serraduy y Las Paúles.

La figura 3 compara la precipitación registrada por trimestres en el periodo de estudio con los datos históricos de las tres estaciones del I.N.M. en la cuenca. El año 2000 fue algo más lluvioso que la media, mientras que en el año 2001 las cantidades totales de precipitación estuvieron algo por debajo de la media. En total, únicamente cuatro eventos superaron los tres años de periodo de retorno. La figura 4 recoge los principales eventos de precipitación recogidos en la estación del I.N.M. en Serraduy durante los años 2000 y 2001.

Los tres pluviógrafos sólo funcionaron conjuntamente durante seis meses (junio-noviembre de 2000). Se observó que la precipitación en Las Paúles cayó de forma poco torrencial puesto que sólo un 40% (208 mm) cayó en forma de tormenta

de más de 10 mm. Sin embargo, en la parte más alta de la cabecera de la cuenca (pluviógrafo de Corva, 2200 m s.n.m.) la precipitación fue de carácter más torrencial, puesto que el 80% (281 mm) lo hizo en forma de tormenta de más de 10 mm. En la parte media de la cuenca (Serraduy) llovió más pero en la cabecera (Corva) lo hizo de manera más intensa (Tabla 2). En la figura 5 se presenta un ejemplo de hietograma quinceminutal de precipitación (episodio de 10/6/2000). El hietograma ilustra la variabilidad de la lluvia en cuanto a desfase temporal, intensidades máximas y volúmenes totales. En este caso, la precipitación total en Serraduy (parte media de la cuenca) fue el doble que en Las Paüles y Corva (parte alta).

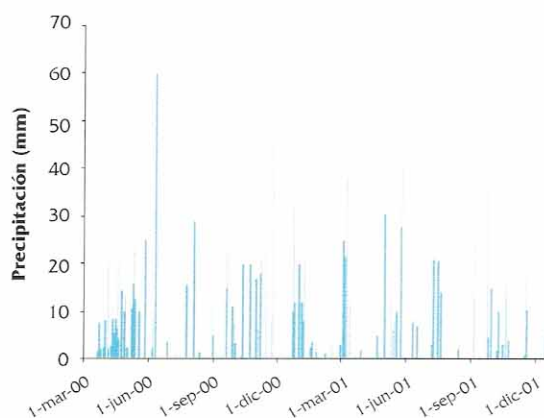


Figura 4. Precipitación diaria (mm) en la estación del I.N.M. de Serraduy (2000-2001).

Tabla 2. Intensidad (media $\pm$ desviación estándar) y precipitación total por pluviógrafos de todas las tormentas durante el periodo junio-noviembre 2000

Pluviógrafo	Nº de tormentas	Intensidad media (mm/h)	Precipitación total (mm)
Corva	8	6,50 $\pm$ 4,0	281,2
Las Paüles	9	4,16 $\pm$ 2,0	208,1
Serraduy	13	5,26 $\pm$ 3,4	346,3

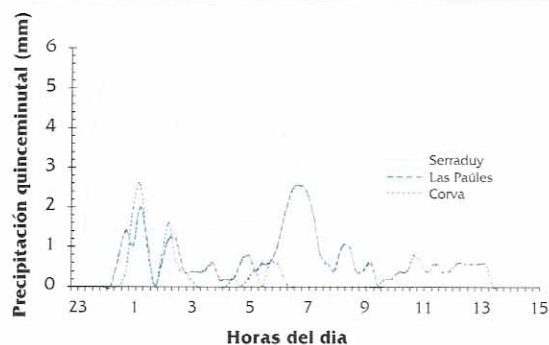


Figura 5. Precipitación quinceminutal del episodio de 10/6/2000 para los pluviógrafos de Serraduy, Las Paüles y Corva.

Comparación de datos de precipitación

Se compararon los datos obtenidos Serraduy a partir de tres tipos de medida: (pluviómetro totalizador, pluviógrafo registrador y estación pluviométrica I.N.M.). En promedio el valor del totalizador y el de la estación pluviométrica I.N.M fueron respectivamente un 20% y un 13% menor al dato del pluviógrafo. Esta diferencia podría deberse a la evaporación en el depósito del totalizador, aunque parece difícil puesto que se hallaba enterrado. Tampoco se puede descartar un error por exceso en el pluviógrafo debido al efecto del viento o bien de la formación de algas en el balancín.

El desajuste entre pluviógrafo propio y pluviómetro del I.N.M. en Serraduy se estudió también a escala diaria, comparando el dato del I.N.M. con el dato integrado diario del pluviógrafo. En la figura 6 se presenta en forma acumulada la precipitación registrada en el año 2001 a partir de los dos métodos. La cantidad total de precipitación fue de 550 mm según el pluviógrafo y de 461 mm según el I.N.M. Además, se observa que el desfase se acumula en los episodios más intensos, especialmente en el del 29-30/4/2001 (121 mm el pluviógrafo y 65 mm según el I.N.M.). Siendo una diferencia tan importante, se intentó contrastar con la tercera fuente de datos disponibles, los totalizadores de lluvia. La comparación con los datos del totalizador más cercano (Congustro) para el periodo 27/4/2001 al 17/5/2001 también indica una infravaloración de los datos del I.N.M. del 15%. En cualquier caso esta última comparación es meramente orientativa, puesto que la localización es diferente. Partiendo de la observación que los desfases se concentran en los episodios más intensos, se puede interpretar que en ese tipo de episodio el depósito del pluviómetro I.N.M. rebosa.

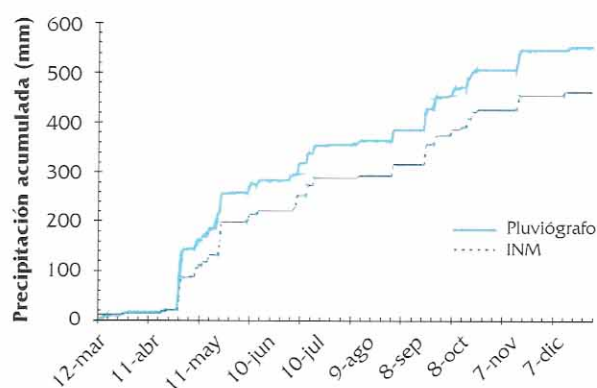


Figura 6. Precipitación acumulada (mm) comparada entre el pluviógrafo registrador propio y la estación del I.N.M. de Serraduy (2001).

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ISÁBENA (CUENCA DEL EBRO). I: VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

Tabla 3. Valores medios de parámetros de intensidad y duración para las tormentas registradas simultáneamente en los pluviógrafos de Las Paúles y Serraduy

Parámetro (media ± desviación estándar)	Las Paúles	Serraduy
Duración (h:min)	10:00 ± 4:48	9:54 ± 6:03
Desfase respecto Las Paúles (h)	0,0	-0,40 ± 1,61
Tiempo al pico (h:min)	5:16 ± 3:39	4:51 ± 4:56
Desfase del t_{pico} respecto Las Paúles (h)	0,0	-0,81 ± 3,63
Intensidad máxima 15' (mm/h)	8,55 ± 5,37	13,25 ± 10,35
Intensidad media (mm/h)	2,85 ± 1,44	3,99 ± 3,67
Total evento (mm)	24,68 ± 14,47	30,44 ± 26,63
Precipitación total respecto Las Paúles (%)	100	119,24 ± 56,3

Análisis de intensidad y duración de los eventos de precipitación

El análisis de la intensidad y la duración se ha realizado para los eventos con precipitación superior a 10 mm. En la tabla 3 se comparan los datos del pluviógrafo de Serraduy, en la parte media de la cuenca, con el de Las Paúles, en cabecera. La duración de las tormentas fue bastante variable, oscilando en ambos casos alrededor de las 10 horas. El desfase temporal tanto del inicio de lluvia como del punto de máxima intensidad quinceminutal entre las dos estaciones fue de media hora a una hora. La intensidad media en Serraduy fue de 4 mm/h, con un pico quinceminutal medio de 13 mm/h., y menor en Las Paúles. La precipitación total fue un 20% mayor en Serraduy que en Las Paúles. Sin embargo, en Serraduy la precipitación presentó una mayor variabilidad (desviación estándar 56%), lo cual implicaría que en algunos episodios la precipitación fue inferior a la de Las Paúles. En la tabla 4 se recogen resumidos los datos de todas las tormentas registradas durante el periodo en que funcionaron los pluviógrafos de Las Paúles y de Serraduy (Tabla 1), tanto las simultáneas en los dos puntos de muestreo como las que sólo afectaron a uno de ellos.

Tabla 4. Resumen de características de las tormentas >10 mm registradas en los pluviógrafos de Las Paúles y Serraduy durante el periodo de funcionamiento simultáneo

Pluviógrafo	Precipitación total (mm)	Precipitación en tormentas (mm)	Nº de tormentas	Intensidad media (mm/h)
Las Paúles	1009,6	523,8	24	4,0 ± 2,3
Serraduy	758,9	601,3	21	5,2 ± 4,2

Análisis de la distribución espacial de la precipitación

El análisis multivariante mediante regresión lineal por el procedimiento *stepwise* utilizado para relacionar los datos de lluvia con la longitud (coordenada X), la latitud (coordenada Y), y la altitud (coordenada Z), dio como resultado un polinomio lineal (1). El nivel de probabilidad, tanto de entrada como de salida ($Pr > F$) fue de 0.05. La ecuación completa obtenida es

$$P = 1,37 \cdot 10^{-3} X + 1,84 \cdot 10^{-3} Y - 8936,31 \quad (1)$$

donde P se expresa en % (respecto a la media de la cuenca), y X e Y se expresan en m (UTM 30N).

Se observa que, pese a ser considerada en el análisis, la variable Z (altura) no resultó significativa estadísticamente en el análisis multivariante. En cambio sí lo fueron las variables X e Y. El coeficiente 0,00184 en la variable Y significa que, como promedio, cada 1000 m hacia el norte se produce un aumento de 1,84% en la precipitación (respecto a la precipitación media caída en la cuenca). Para un episodio tipo de 40 mm esto supone un gradiente de 0,74 mm/km. El gradiente es menor que, por ejemplo, el 5,3% por km que se da en los Alpes del Sur de Nueva Zelanda (Henderson y Thompson, 1999). También resultan muy superiores las variaciones de hasta el 14% asociadas a tormentas convectivas en una pequeña cuenca experimental de Arizona (Goodrich *et al.*, 1995).

Aunque la variable X fue significativa (explicó algo más del 1% de variabilidad) y con un coeficiente positivo, ello no indica ninguna tendencia clara al aumento o disminución la precipitación en la dirección Este-Oeste. El 40% de explicación de la variabilidad de la precipitación en base a parámetros físicos (Tabla 5) es inferior al rango 46-75% de explicación de variabilidad encontrado en la región mediterránea francesa de Cévennes (Canellas y Merlier, 1994).

Tabla 5. Resultados de la regresión lineal por el procedimiento stepwise para las variables X,Y,Z, en relación a la variabilidad de la precipitación

Variable seleccionada	Coefficiente	Error estándar	r ² acumulada
Y	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$1,511 \cdot 10^{-4}$	0,39
X	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$4,127 \cdot 10^{-4}$	0,41
Constante	-8936,31	654,8	

Se realizó asimismo una regresión *stepwise* únicamente con las variables altitud (Z) y precipitación, con el fin de determinar un posible gradiente altitudinal de la precipitación. La correlación fue baja $r^2 = 0,29$, lo cual indica que el gradiente altitudinal a nivel de cuenca no es claro. En cualquier caso, la pendiente de la recta $P = aZ + b$ fue 0,068 lo que implica que cada 100 m de incremento de altitud, la precipitación aumentaría un 6,8%. Para un episodio de 40 mm, por ejemplo, esto significaría 27 mm/km. Remenieras (1974) indica valores sensiblemente mayores en la vertiente norte del Pirineo.

Estimación de la precipitación por subcuenca a partir de una sola estación de referencia

La interpolación espacial de los datos de totalizadores permitió calcular valores de precipitación en cada subcuenca para los diferentes eventos. A partir de ese dato integrado, se plantearon regresiones lineales múltiples para cada

subcuenca, con el fin de determinar qué pluviómetros eran los mejores estimadores de cada una de ellas. Los resultados se presentan en la tabla 6. Cabe observar que las subcuencas con mejor estimación fueron las del norte (Villacarli y Cabeceira), en las cuales la regresión encontrada explica más de un 90% la variabilidad de la precipitación. En las subcuencas de la parte media y baja, las regresiones explicaron alrededor del 70% de la variabilidad, lo cual se puede explicar parcialmente por la menor densidad de pluviómetros. El error medio y la desviación estándar de los residuos, fruto de la aplicación de los polinomios a los mismos episodios en que fueron derivados, figura en la tabla 7. En general los errores medios fueron positivos (entre 0 y 5 mm) y las desviaciones estándar no pasaron de 15 mm. En porcentaje, estos valores suponen errores de entre un 10 y un 15%, excepto en Lascuarre donde el error fue superior al 100%.

En cuanto a la validación aplicando los polinomios a los episodios de 3/11/2001 y 3/12/2001, se observó un buen ajuste para las subcuencas de Carrasquero y Ceguera, así como del polinomio (2) (tabla 7) para la subcuenca de Villacarli. La cuenca de Lascuarre presentó errores superiores a los 10 mm en ambos episodios, lo cual confirmó dicho polinomio como el de peor ajuste. La subcuenca de Cabecera, presentó un error considerable en un episodio determinado, correspondiente a un periodo de lluvias de varios días, el dato de referencia del cual no resulta muy fiable para la validación.

Tabla 6. Regresiones lineales para la mejor estimación la precipitación en las subcuencas del Isábena

Subcuenca	Estaciones seleccionadas	Ecuación	r ²
Cabecera	Coll de Fadas (C)	$P = 0,898C + 6,38$	0,92
Villacarli (1)	Coll de Fadas (C), Torre la Ribera (T), Espés (E)	$P = 0,781C + 0,562T - 0,435E + 3,93$	0,92
Villacarli (2)	Visalibons (V)	$P = 0,872V + 6,87$	0,81
Carrasquero	Congustro (CG)	$P = 0,890CG + 14,93$	0,70
Ceguera	Casiasas (CS)	$P = 0,776CS + 8,87$	0,73
Lascuarre	Sala (S)	$P = 0,669S + 9,08$	0,69

Tabla 7. Errores porcentuales medios de los polinomios de ajuste para las diferentes subcuencas, y errores de los dos episodios de validación

	Cabecera	Villacarli (1) y (2)	Carrasquero	Ceguera	Lascuarre
Error medio ± desviación	9,4 ± 21,4	12,7 ± 27,6 13,3 ± 20,3	-6,9 ± 24,3	15,2 ± 37,5	129,7 ± 352,4
Error validación 3/11/01	41,3	61,2 1,5	14,1	-2,3	29,2
Error validación 3/12/01	16,7	15,3 -2,9	19,9	12,7	208,5

Comparación entre metodologías de estimación areal de precipitación

La tabla 8 muestra los errores entre la estimación por interpolación de datos de totalizadores y la estimación por subcuenca ponderando por el área según el método de los polígonos de Thiessen, a partir de los datos de las estaciones del I.N.M. Se observa que las estimaciones son aceptables para precipitaciones menores a 40 mm, mientras que para precipitaciones superiores a 80 mm predominaron los errores por defecto, más importantes cuanto mayor es el volumen de precipitación, llegando a errores de casi 80 mm para una precipitación de 160 mm. Asumiendo que la interpolación espacial de datos de la red de totalizadores se acerca más a la medida real de la precipitación en las subcuencas, la estimación por el método de Thiessen habría infravalorado la precipitación real en un 50%.

Además de la estimación de error que se cometería al aplicar una metodología de uso extendido como Thiessen en una zona de montaña, los datos permitieron comparar la eficacia de este método con el método de ajuste de un polinomio por subcuenca. Comparando las tablas 7 y 8 se puede observar que los errores porcentuales fueron ligeramente inferiores en el caso de los polinomios ajustados, salvo en el caso de la subcuenca de Lascuarre debido seguramente a la escasez de totalizadores. La mejora más significativa aplicando el polinomio ajustado se dio en la subcuenca de Villacarli, donde para los episodios de validación se pasó de un error medio del 13% por Thiessen a uno del 2% aplicando el polinomio ajustado.

La elección de la localización más idónea para un pluviógrafo en cada cuenca se ha hecho únicamente en base al mejor ajuste estadístico del polinomio de estimación, partiendo de los 26 totalizadores disponibles. Para posteriores estudios se deberían incorporar métodos geoestadísticos para el diseño de redes de muestreo, que se basa en que la varianza del krigeado no depende del valor de la variable en un punto, sino del semivariograma y de la posición espacial.

CONCLUSIONES

El estudio de la variabilidad de la precipitación en la cuenca del río Isábena ha mostrado que existe un gradiente latitudinal importante, el cual se debe tener en cuenta para estimar la precipitación media total y por eventos tanto a nivel de cuenca como de subcuencas. La altitud también es una variable a tener en cuenta, aunque en el caso del Isábena se trata de una variable que explica sólo una pequeña parte de la variabilidad de la precipitación. El estudio ha desarrollado las herramientas estadísticas necesarias (polinomios) para la estimación de la precipitación en puntos de la cuencas a partir de las variables físicas indicadas. También se ha puesto de manifiesto la existencia de dos tipos de errores al usar datos de la red oficial de estaciones pluviométricas. Por una parte, en la estimación de la precipitación se comete un error medio por defecto cercano al 30%, incluyendo errores de medida y debido a la pobre representación de la variabilidad espacial y, por otra parte, un error relacionado con el desfase temporal de la precipitación entre subcuencas. La metodología propuesta en la presente investigación permite cuantificar y minimizar dichos errores. El primero, con el uso de polinomios de ajuste; el segundo, con la instalación estratégica de pluviógrafos en vez de pluviómetros.

La metodología para la obtención de modelos de variación espacial de precipitaciones desarrollada en esta investigación puede ser de utilidad en otras cuencas de similares características, en las que las redes oficiales de pluviómetros son insuficientes o no están correctamente situadas para abordar la correcta caracterización de la respuesta hidrológica de dichas cuencas de drenaje.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado cuando el primer autor era alumno de doctorado en el Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lleida, gracias a una beca de Formación de Personal Investigador de la Generalitat de

Tabla 8. Errores porcentuales de estimación de precipitación por subcuenca comparando la metodología tradicional (Thiessen) con las estimaciones a partir de totalizadores

	Cabecera	Villacarli	Carrasquero	Ceguera	Lascuarre
Error medio (%)	-15,0 ±				
± desviación	33,2	-15,3 ± 20,5	-16,3 ± 27,0	-11,1 ± 22,5	-4,4 ± 29,9
Error 3/11/01	13,4	23,4	15,7	12,9	-9,9
Error 3/12/01	-68,3	2,0	32,0	16,4	-9,8

Catalunya. El Instituto de Estudios Altoaragoneses aportó una ayuda económica para la realización de la investigación. Los autores agradecen especialmente la colaboración en el trabajo de campo de los estudiantes Jordi Valls y Damià Vericat.

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentaje
I.N.M:	Instituto Nacional de Meteorología
km:	Kilómetros
m:	Metros
mm:	Milímetros
P:	Precipitación (en milímetros)
r^2 :	Correlación (grado de ajuste de regresión lineal) (en tanto por uno)
X:	Coordenada longitudinal UTM huso 30n zona T (en m)
Y:	Coordenada latitudinal UTM huso 30n zona T (en m)
Z:	Altitud sobre el nivel del mar (en m)

REFERENCIAS

- ANDRIEU, H., FRENCH, M.N., THAUVIN, V., KRAJEWSKI, W.F., (1996). Adaptation and application of a quantitative rainfall forecasting model in a mountainous region. *Journal of Hydrology*, 184: 243-259.
- BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I., (1976). Evaluation of mean square error involved in approximating the areal average of a rainfall event by a discrete summation. *Water Resources Research*, 12 (2): 181-184.
- CANELLAS, C., MERLIER, (1994). Evaluation et cartographie de valeurs extremes de précipitations. *Cruet et inondations*, 1: 131-136.
- DESUROSNE, I.; OBERLIN, G.; RIBOT, B.J., (1991). Corrélogrammes spatio-climatiques des intensités de pluie en montagne. *Hydrologie Continentale*, 6 (2): 91-107.
- DHAR, O.N.; BHATTACHARYA, B.K., (1976). Variation of rainfall with elevation in the Himalayas: a pilot study. *Indian J. Power River Val. Dev.*, 26 (6): 179-185.
- DUGO PATÓN, M., GONZÁLEZ GARCÍA, M., CABEZAL GÓMEZ, L., (1994). *Ciclo hidrológico. El agua atmosférica: humedad y precipitación*. Ediciones de la Escuela Politécnica Superior de Lugo.
- ESBENSEN, K.; SCHÖNKOPF, S.; MIDTGAARD, T., (1996). *Multivariate analysis in practice*. Ed. Camo AS.
- GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J.J., et al., (2002). Incorporating information from a digital elevation model for improving the areal estimation of rainfall: Geoenvironment III
- GOODRICH, D.C.; FAURES, J.M.; WOOLHISER, D.A.; LANE, L.J.; SOROOSHIAN, S., (1995). Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 173 (1/4): 283-308.
- GRIMES, D.I.F.; PARDO-IGÚZQUIZA, E.; BONIFACIO, R., (1999). Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, 222(1-4): 93-108.
- HENDERSON, R.D., THOMPSON, S.M., (1999). Extreme rainfalls in the Southern Alps of New Zealand. *NZ Journal of Hydrology*, 38(2): 309-330.
- JOHNSON, G., HANSON, C., (1995). Topographic and atmospheric influences on precipitation variability over a mountainous watershed. *Journal of Applied Meteorology*, 34: 68-87.
- KIEFFER-WEISSE, A., BOIS, P., (2001). Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps. *Journal of Applied Meteorology*, 40: 720-740.
- LLASAT, M., PUIGSERVER, M., (1992). Pluies extremes en Catalogne: influence orographique et caractéristiques synoptiques. *Hydrologie continentale*, 7: 99-115.
- LOPEZ, R.E.; ATLAS, D.; ROSENFELD, D.; THOMAS, J.L.; BLANCHARD, D.O.; HOLLE, R.L., (1989). Estimation of areal rainfall using the radar echo Area Time Integral. *Journal of Applied Meteorology*, 28(11): 1162-1175.
- OKI, T.; MUSIAKE, K.; KOIKE, T., (1991). Spatial rainfall distribution at a storm event in mountainous regions, estimated by orography and wind direction. *Water Resources Research*, 27(3): 359-369.
- PARDO IGÚZQUIZA, E., (1998). Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, 210 (1/4): 206-220.
- REMENIERAS, G., (1974). *Tratado de hidrología aplicada*. Editores Técnicos Asociados SA. Barcelona.
- SINGH, V.P., (1976). A rapid method of estimating mean areal rainfall. *Water Resources Bull.*, 12 (2): 307-315.
- SIVAPALAN, M., BLÖSCHL, G. (1998). Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204: 150-167.
- SPREEN, W.C., (1947). A determination of the effect of topography upon precipitation. *Transactions American Geophys. Union*, 2: 285-290.
- TANG-CHANG, Y.; SHINDO, S.; MACHIDA, I.; TANG, C.Y., (1998). Topographical effects on the distributions of rainfall and ^{18}O distributions: a case in Miyake Island, Japan. *Hydrological Processes*, 12(4): 673-682.
- VALLS, J. (2002). *Estudi de l'heterogeneïtat espacial a la conca de l'Isábena (Huesca)*. Trabajo Práctico Tutorado. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària, Universitat de Lleida (Trabajo inédito).
- VERDÚ, J.M. (2003). *Análisis y modelización de la respuesta hidrológica de una extensa cuenca de montaña mediterránea (Río Isábena, PrePirineo)*. Tesis doctoral. Universitat de Lleida.