

EVOLUCIÓN DE LA AGRESIVIDAD PLUVIOMÉTRICA EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS ESPAÑOLAS (1940-2010)

Leoncio GARCÍA-BARRÓN¹, Julia MORALES², Mónica AGUILAR³, Arturo SOUSA²

¹Dpto. de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla; ²Dpto de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla; ³Dpto. de Geografía Física, Universidad de Sevilla

leoncio@us.es; jmorales@us.es; malba@us.es; asousa@us.es

RESUMEN

Entre los posibles efectos ambientales de la precipitación destaca la erosión del suelo. Desde distintos campos se ha estudiado la erosión, generalmente referida a un área local, pero son poco frecuentes los estudios referidos a su variabilidad temporal. El presente estudio se basa en la precipitación mensual estimada por el modelo SIMPA (Mtº de Medio Ambiente) para cada cuenca hidrográfica española durante 1940-2010. Las cuencas se han agrupado por analogía climática en seis zonas geográficas. Para cada año se calcula la agresividad pluviométrica mediante el índice modificado de erosión potencial de Fournier, I_{FM} . Así, se genera la serie interanual, con I_{FM} como nueva variable. Los resultados obtenidos permiten caracterizar la agresividad pluviométrica en España, determinar su evolución a lo largo de los últimos decenios y contrastar el comportamiento en los distintos ámbitos espaciales.

Palabras claves: Erosión, precipitación, cuencas hidrográficas, España.

ABSTRACT

Soil erosion is remarkable environmental effect caused by precipitation. From different fields has been studied erosion, but are rare studies related to variation in time. This study is based on monthly precipitation estimated by the SIMPA (Mtº of Environment) for each Spanish basin during 1940-2010. The basins have been grouped into six areas analogy geographical climate. For each year is calculated rainfall aggressiveness through the modified index of erosion potential Fournier, I_{FM} . The results obtained allow us to show the aggressiveness rainfall in Spain, to determine their evolution over the past decades and contrast the behavior in different spatial areas.

Key words: erosion, precipitation, watershed, Spain.

1. INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica está situada la zona de transición entre las latitudes medias y los climas subtropicales. Además, está enmarcada por el mar Mediterráneo al este y con fachada occidental al océano Atlántico. De topografía compleja, las cadenas montañosas delimitan a las cuencas hidrológicas, las cuales presentan características pluviométricas diferenciadas. Así, la localización geográfica y el relieve de la Península Ibérica dan lugar a la diversificación de ámbitos climáticos, que repercuten en la variedad paisajística, natural y ambiental y, en particular, en la intensidad de la erosión.

Salvo en la franja costera del norte, la Península Ibérica está incluida en el dominio de clima de tipo mediterráneo. Por ello, las cuencas hidrológicas, excluidas las de la vertientes cantábrica, presentan las características generales del clima mediterráneo: irregularidad interanual que comporta años relativamente lluviosos junto a periodos recurrentes de sequía, valores mínimos de precipitación durante los meses de verano, alta concentración de lluvia durante sólo algunos días.

Existen múltiples estudios sobre la distribución espacial de la precipitaciones en la Península Ibérica, la tendencia y variabilidad temporal y el reparto intranual. También desde distintas perspectivas -forestales, agrícolas, hidrológicos, desertificación, etc.- se ha estudiado el impacto de la erosión (CEC, 1992), generalmente vinculada a áreas geográficas localizadas. Sin embargo, son poco frecuentes los estudios referidos a la evolución temporal de los indicadores de erosión, que cubran grandes superficies. La erosión es un fenómeno complejo en que interviene junto a la precipitación, la textura y características física y química de los suelos, la protección que ofrece la cubierta vegetal, la pendiente de las laderas, etc. La erosión pluviométrica depende de la precipitación total y de la intensidad con que se produce cada episodio de lluvia. El presente estudio sobre erosividad en las cuencas hidrográficas españolas se centra, particularmente, en el cálculo de la agresividad pluviométrica potencial basada en la precipitación mensual estimada. El análisis espacio-temporal pretende establecer la evolución de la erosividad durante el periodo 1940 a 2010 en las cuencas hidrográficas españolas.

2. ÁREA DE ESTUDIO y DATOS

El área de estudio es el territorio español de la Península Ibérica. Para facilitar la exposición de resultados, el conjunto territorial se ha dividido en grandes zonas geográficas considerando las características generales de la distribución intranual de precipitación (García Barrón *et al*, 2010). Estas zonas están constituidas por agregación de las correspondientes cuencas hidrográficas. El Servicio de Información del Agua (SIA) es el organismo del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España encargado de la gestión de los recursos hídricos (superficiales y subterráneos), la calidad, estado ambiental y la prevención de riesgos en las cuencas hidrográficas españolas. En colaboración con departamentos universitarios han elaborado el “sistema integrado de modelización precipitación-aportación” (SIMPA).

Para la información climática, el modelo SIMPA estima la precipitación de cada cuenca hidrográfica española, mes a mes durante todo el periodo de simulación, a partir de los datos registrados en los pluviómetros oficiales seleccionados (AEMET, Servicio Hidrográfico, etc.). La falta de estaciones en las comarcas más elevadas produce infravaloraciones importantes de la lluvia en muchas cabeceras de cuenca. Para suplir esta carencia se han generado series de precipitaciones basadas en algoritmos específicos regionales que mejoran la interpolación analizando los factores que condicionan el proceso (precipitación, altitud, orientación, pendientes, etc.). Las series mensuales básicas utilizadas en el presente estudio son las series oficiales SIA del anterior Mtº de Medio Ambiente; se consideran homogéneas y no presentan lagunas. Si bien, algunos observatorios meteorológicos poseen registros pluviométricos diarios, y las actuales estaciones automáticas proporcionan información horaria que permite valorar la intensidad de lluvias locales, el modelo SIMPA presenta la ventaja de que es adecuado para analizar con fiabilidad el desarrollo de la precipitación estimada en grandes áreas y durante periodos plurianuales.

El presente estudio comprende el periodo 1940-2010. Las cuencas hidrográficas españolas han sido agrupadas por los autores en seis zonas geográficas por similitud en la distribución interanual de la precipitación. (Figura 1). La precipitación asignada a cada zona se calcula a partir de la precipitación mensual de las cuencas integrante, ponderadas en función de las respectivas superficies. Los porcentajes entre paréntesis indican la proporción relativa de la superficie de cuenca respecto de la zona en la que se incluye. Las cuencas españolas de los ríos Duero (42%), Tajo (29%) y Guadiana (29%) dan lugar a la zona que denominamos **Meseta** con 190.000 Km². Denominamos **Bética** con 57.700 Km² a la cuenca del Guadalquivir (87 %) junto a la Atlántica Andaluza (13 %). Consideramos zona **Mediterráneo**, con 103.300 Km² la formada por las cuencas Andaluza Mediterránea (19%), Segura (19 %), Júcar (44 %) y de Cataluña (17%). La zona **Ebro** está constituida únicamente por la cuenca del Ebro con 85.900 Km². La zona **Cantábrico** (25.343 Km²) la forman las cuencas de ríos de la vertiente norte de la cordillera Cantábrica que desembocan en el mar del mismo nombre, incluidas los de la región vasca. La zona **Galicia** (34.056 Km²) la forman la agrupación de la cuenca Miño-Sil (52 %) con las de otros ríos menores de esta región.



FIG. 1: Mapa indicativo de la agrupación de las cuencas hidrográficas españolas.

Aunque las cuencas portuguesas son prolongación de las correspondientes cuencas españolas de la Meseta (Duero, Tajo y Guadiana), en este análisis no se incluye el territorio de Portugal peninsular.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio se basa en el análisis estadístico de las series anuales de agresividad pluviométrica potencial I_{MF} de cada una de las zonas hidrológicas. A partir del I_{MF} anual de 1940 a 2010, elaboramos la correspondiente serie interanual para las seis zonas climáticas españolas establecidas. El cálculo de la agresividad pluviométrica potencial se realiza por medio del “índice modificado de erosión de Fournier” I_{MF} (Fournier 1960, Arnold 1980)

$$(1) \quad I_{MF} = (\sum p_m^2) / P$$

en que p_m es la precipitación mensual de cada uno de los meses ($m = 1, 2, \dots, 12$), y P la precipitación total anual correspondiente. Para la misma precipitación total, el índice se ve afectado por la distribución intranual de la precipitación. El índice I_{MF} determina la agresividad pluvial por lo que se utiliza como uno de los factores que contribuye al impacto de erosión.

Ello permite caracterizar cada zona y analizar su evolución, así como establecer el contraste de comportamiento entre las distintas zonas. El análisis temporal de la serie interanual I_{MF} incluye la tendencia, así como su variabilidad. Para poner de manifiesto la irregularidad temporal utilizamos, además del coeficiente de variación de cada serie completa, el coeficiente de variación móvil por periodos de once años, y los índices de disparidad general y específico, utilizado por los autores en anteriores trabajos (García Barrón *et al*, 2011).

El coeficiente de variación móvil por periodos de once años se define como el cociente de la desviación típica de la agresividad anual en la subserie parcial formada por el año de referencia i y los diez anteriores, y su correspondiente promedio

$$(2) \quad C_i = \sigma_{(i, i-10)} / \mu_{(i, i-10)}$$

El índice de disparidad general I_D se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones consecutivas extendida a toda la serie I_{MF} , partido por el número de sumandos, y dividido a su vez por el valor medio m_R de la serie completa. Así, si r_i es la agresividad pluviométrica correspondiente al año i y r_{i+1} la del año siguiente, resulta

$$(3) \quad I_D = (\{ \Sigma[(r_{i+1} - r_i)^2] / N-1 \}^{1/2}) / \mu_R$$

El índice particular de disparidad relativo al año i , I_{di} , considera únicamente por los elementos $\{r_{i-1}, r_i, r_{i+1}\}$ de la serie cronológica, siendo m_i de la media de los tres elementos consecutivos centrados en i .

$$(4) \quad I_{di} = (\{ [(r_i - r_{i-1})^2 + (r_{i+1} - r_i)^2] / 2 \}^{1/2}) / \mu_i$$

4. RESULTADOS Y VALORACIÓN

4.1. Caracterización de la agresividad pluviométrica potencial

Los valores del análisis de la serie completa de la variable I_{MF} se recogen en la tabla 1. Podemos resaltar que la agresividad pluviométrica potencial es moderada (< 90 l/m²) en las cuencas Mediterráneo, Ebro y Meseta; intensa (> 120 l/m²) en las zonas Bética, Galicia y Cantábrico. La interpretación de estos resultados ya indican que I_{MF} está muy influenciado por la precipitación total anual que enmascara sucesos de lluvia intensas de corta duración.

I_{MF}	Bética	Meseta	Ebro	Mediterráneo	Galicia	Cantábrico
Promedio	120,8	74,0	67,3	60,1	167,6	138,8
Pendiente	0,058	- 0,009	- 0,003	0,012	-0,154	-0,062
R^2	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,01

TABLA 1: Caracterización de la agresividad pluviométrica potencial durante el periodo 1940-2010.

Las correspondientes series anuales muestran ligeras pendientes ascendentes o descendente pero sin significación climática, ya que la varianza explicada por la recta de tendencia es, en todos los casos, inferior a la centésima. El valor central, por tanto, no es suficiente predictor del

comportamiento de la erosividad pluviométrica. Sin embargo, las desviaciones relativas acumuladas, respecto de su promedio, permiten distinguir secuencias de comportamientos plurianuales diferenciados. Todas las zonas analizadas presentan, con sus dientes de sierra, un tramo inicial descendente, consecuencia de mayor frecuencia de valores de I_{FM} inferior al promedio; en 1958 cambia la orientación con un tramo ascendente (valores altos de I_{FM}) de hasta 1971, en que cada área geográfica presenta características propias (Figura 2 a, b, c). En particular, las cuencas del Cantábrico y Galicia presentan durante el último treintenio un marcado carácter descendente, por la reiterada ocurrencia de años con valores menores que el promedio de sus series completas.

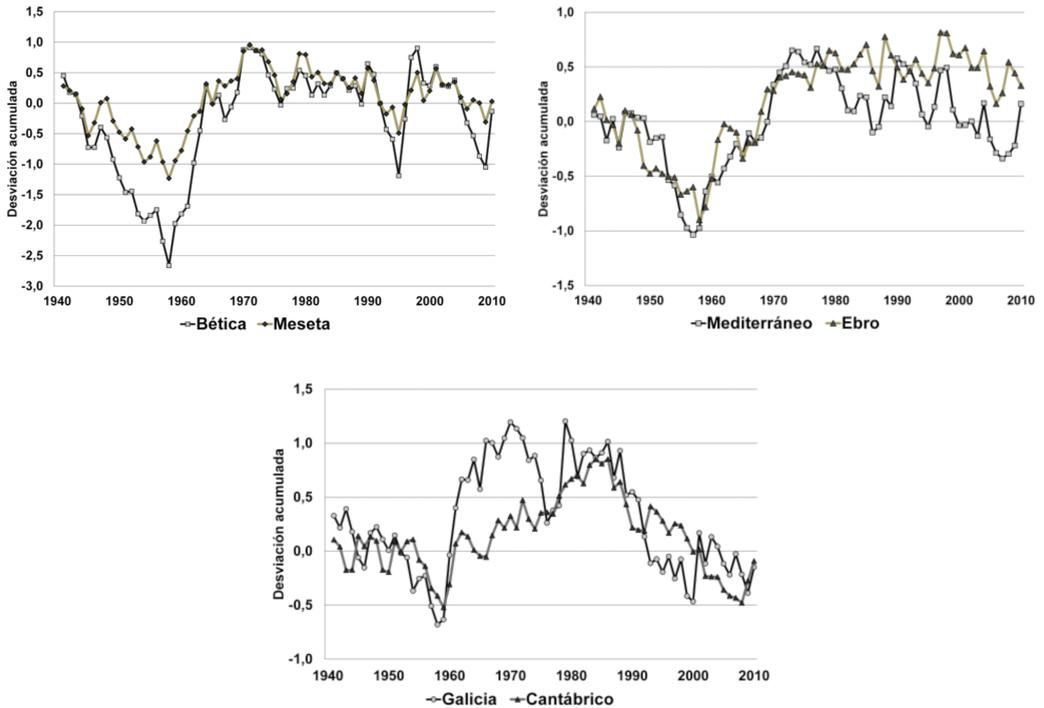


FIG. 2: a, b, c. Desviaciones acumuladas de la erosividad potencial de las cuencas hidrográficas agrupadas por zonas geográficas.

El coeficiente de correlación entre las series anuales I_{FM} de las zonas establecidas permite comparar si estas han seguido evolución análoga. En la tabla II podemos deducir que la correspondencia interanual del I_{MF} es alta ($> 0,7$) entre Meseta y Bética o Mediterráneo: el perfil de las fluctuaciones temporales de la agresividad potencial mantiene relativa simultaneidad. Sin embargo, entre el Cantábrico y estas tres zonas citadas es muy baja ($< 0,1$), lo que permite deducir de los distintos estados que dan lugar a la precipitación en las respectivas zonas.

Los resultados expuestos se justifican por el régimen de precipitación en cada una de las áreas constituidas por la agrupación de cuencas. Las borrascas del SW y, menos intensas del NW, determinan el régimen de precipitaciones de las cuencas atlánticas, principalmente Bética y Galicia, amortiguadas en la Meseta por el efecto de continentalidad, debida a la mayor lejanía de la fachada marina occidental. La influencia del anticiclón de las Azores, situado al suroeste de Portugal durante gran parte del año, limita la entrada de borrascas del SW que son desplazadas hacia regiones más septentrionales. Ello

explica, dentro del mismo ámbito, el gradiente entre el suroeste y noroeste peninsular: mayor precipitación en Galicia distribuida más regularmente; el mismo efecto sur-norte, más atenuado, también se produce en la Meseta. En el área Mediterráneo, la dificultad para alcanzar los vientos atlánticos las cabeceras de cuencas junto a la posición costera respecto al mar Mediterráneo (con factores relacionados con la circulación atmosférica estacional de otoño, y los influjos húmedos del NE), establecen marcadas diferencias del régimen de lluvia respecto de la Meseta. En el área Cantábrico, la estrecha franja costera, (delimitada por la altitud de la cordillera próxima que retiene el flujo húmedo e impide el paso hacia la Meseta), recibe intensa precipitación, con débil estacionalidad, consecuencia de la presencia de frentes atlánticos del NW durante gran parte del año. La cuenca del Ebro presenta también singularidades meteorológicas respecto del conjunto de la Península Ibérica, debido principalmente al aporte hídrico de la vertiente sur pirinéica, al aislamiento de la Meseta por el sistema ibérico y a la conexión, a lo largo del eje de la cuenca, del mar Cantábrico con el Mediterráneo.

Coefficiente de Correlación	Bética	Meseta	Ebro	Mediterráneo	Galicia	Cantábrico
Bética	1,00	0,84	0,39	0,63	0,53	0,08
Meseta		1,00	0,49	0,51	0,73	0,09
Ebro			1,00	0,48	0,38	0,36
Mediterráneo				1,00	0,03	
Galicia					1,00	0,28
Cantábrico						1,00

TABLA 2: Coeficiente de correlación del índice IFM entre las cuencas hidrográficas durante el periodo 1940-2010.

4.2. Irregularidad interanual

De forma complementaria hemos analizado la irregularidad interanual de las series del índice de agresividad pluviométrica potencial I_{FM} . Para ello, analizamos la variabilidad de la serie en su conjunto mediante el coeficiente de variación en cada agrupación de cuencas considerada. Además, para medir los incrementos del I_{FM} durante años consecutivos calculamos el índice general de disparidad. Los resultados muestran la alta correspondencia entre ambos procedimientos para caracterizar la irregularidad de cada área. (Tabla III).

IMF	Bética	Meseta	Ebro	Mediterráneo	Galicia	Cantábrico
CV	0,38	0,26	0,16	0,18	0,25	0,14
I_D	0,48	0,37	0,22	0,25	0,37	0,19

TABLA 3: Variabilidad (CV) y disparidad (ID) del índice IFM durante el periodo 1940-2010.

Tanto en función del coeficiente de variación CV como de la disparidad general I_D , podemos establecer, para el periodo completo de observaciones, que el territorio norte y oriental español

(Cantábrico, Ebro, Mediterráneo) es de baja irregularidad interanual frente al resto del territorio peninsular.

Obsérvese que el área Mediterráneo no se caracteriza por alta irregularidad interanual del índice I_{FM} ; consideramos ello es debido a permanente escasez, a lo largo del tiempo, de la precipitación total anual en grandes extensiones del territorio que constituye estas cuencas (con independencia de ocasionales lluvias torrenciales localizadas). Los valores inferiores de ambos parámetros en Cantábrico son debidos a la gran uniformidad de la distribución intranual de precipitación y las suaves fluctuaciones interanuales. Por motivos opuestos del régimen pluviométrico, destaca, en sentido contrario, el área Bética en que se obtienen los valores superiores de irregularidad de I_{FM} .

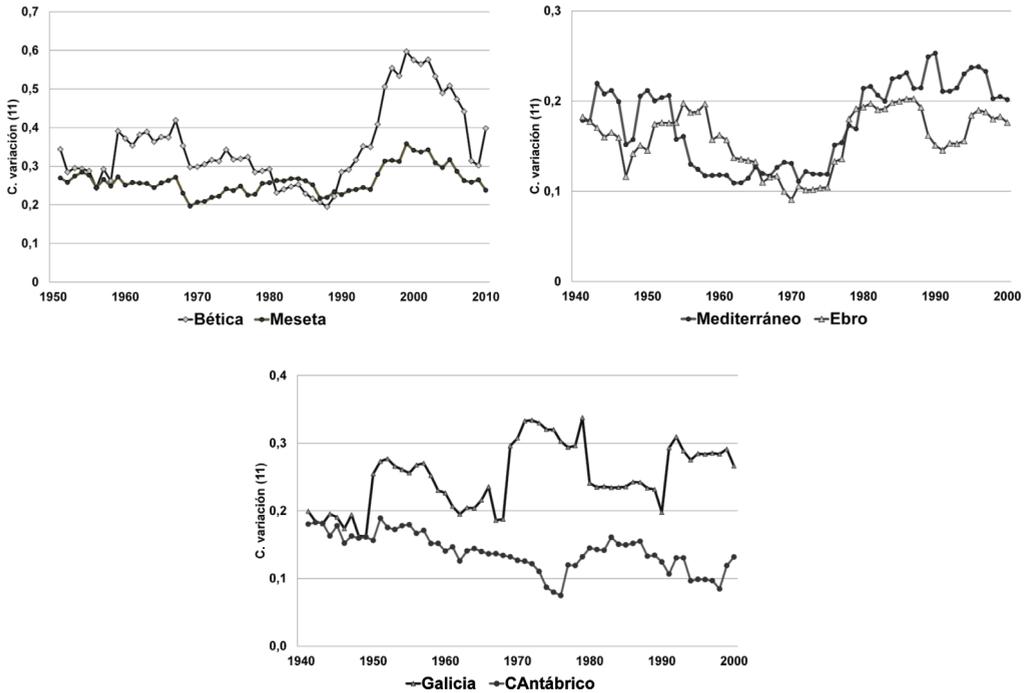


FIG. 3: a, b, c. Coeficiente de variación móvil por periodos de once años de las cuencas españolas.

El estudio de la evolución de las series anuales I_{MF} en cada zona se complementa con el análisis de la irregularidad interanual. Para ello hemos calculado, en primer lugar, el coeficiente de variación por periodos de once años CV_{11} (Figura 3 a,b,c). Hemos elegido esta duración, coincidente con el ciclo solar, ya que permite suavizar los valores extremos aislados sin enmascarar la variabilidad intrínseca de las series. En la evolución temporal podemos observar un marcado incremento de variabilidad en la Bética a partir 1980 en que CV_{11} , desde el entorno previo de 0,3, llega a alcanzar valores superiores a 0,5 para decaer en la última década; con menor intensidad, también presenta similar comportamiento la Meseta. En Ebro y Mediterráneo el coeficiente CV_{11} oscila entre 0,10 y 0,25 con mayor proporción de los valores inferiores durante 1960-1980. La gráfica de Galicia muestra una sucesión de tramos horizontales plurianuales a distinto nivel, enmarcado entre 0,25 y 0,35; comparativamente presenta más variabilidad interanual que otras zonas. En la zona Cantábrico el

coeficiente CV_{II} muestra un perfil decreciente desde 0,2 hasta 0,1 durante el periodo de observación, lo que indica progresiva estabilización interanual del índice I_{MF} en los últimos decenios.

La irregularidad de las series temporales del índice I_{FM} , estudiadas por su variabilidad tiene su reflejo al emplear la disparidad particular como criterio de estudio. Se observa (Fig 4 a, b, c) que el índice anual de disparidad I_{di} ofrece en Bética y Meseta gran simultaneidad en su comportamiento temporal. En estas zonas adquiere valores más frecuentes en el intervalo 0,3 a 0,4 y resalta que los máximos relativos presentan una marcada tendencia positiva desde 1971 hasta 1995, año este en que cambia de signo. Ebro y Mediterráneo mantienen una secuencia temporal de ligeras fluctuaciones alrededor de 0,1, entre 1955 a 1985, pero con extremos relativos superiores a 0,35 anterior y posteriormente a esa época. Por su proximidad geográfica, contrasta el perfil de Cantábrico, descendente y de suave fluctuaciones, con el de Galicia ascendente y de marcadas fluctuaciones.

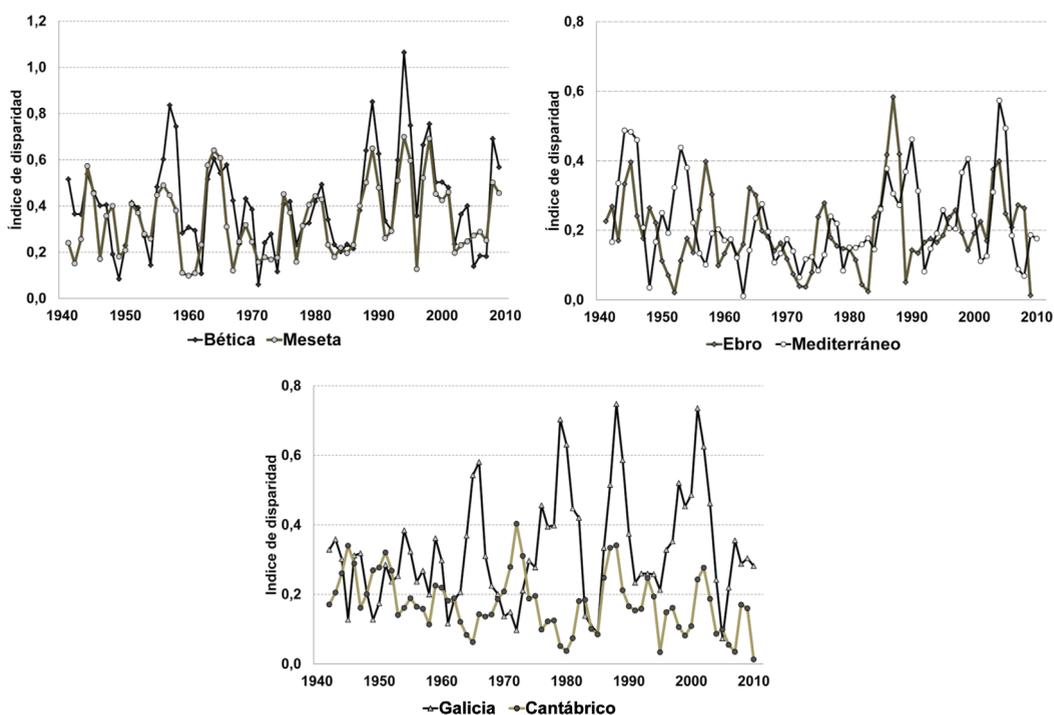


FIG. 4: a, b, c. Índice particular de disparidad anual I_{di} de las cuencas españolas

5. CONCLUSIONES

La ventaja de la información ofrecida por el modelo SIMPA es que proporciona series mensuales de precipitación representativas de grandes áreas, en que los extremos locales quedan amortiguados. Sin embargo, se observa que los altos valores del índice modificado de erosión de Fournier I_{MF} corresponden a precipitación total anual elevada, por lo que consideramos que la distribución intranual queda infravalorada. En el procedimiento de cálculo del I_{MF} se detecta el predominio de la precipitación anual/mensual sobre la intensidad de los episodios de lluvia de corta duración. Valoramos la capacidad del procedimiento empleado, sin embargo, la interpretación de los anteriores resultados induce a considerar que la agresividad pluviométrica potencial I_{MF} , como indicador

fundamentalmente de volumen, puede también complementarse, en futuros estudios, con otros indicadores de erosividad basados en la distribución intranual de la precipitación. Además, planteamos como propuesta metodológica, utilizar datos de observatorios concretos a escala diaria que reflejan, localmente, mejor la irregularidad pluviométrica, e incluso -según disponibilidad de estaciones meteorológicas- analizar episodios localmente intensos que sirva de complemento a la información obtenida con carácter general por el modelo SIMPA. Consideramos que así se lograría incrementar capacidad discriminante para adecuar la información obtenida en series plurianuales con los impactos reales provocados por erosión pluviométrica.

Durante el periodo de análisis, la agresividad pluviométrica potencial es, en conjunto, moderada en las zonas Mediterráneo, Ebro y Meseta e intensa en Bética, Galicia y Cantábrico. La series I_{MF} no presentan tendencia lineal significativa durante el periodo analizado. Se detecta correspondencia interanual de los valores I_{MF} entre Meseta y Bética o Mediterráneo, pero es muy baja entre Cantábrico y las demás zonas, lo que indica las diferencias de régimen pluviométrico. La mayor irregularidad, medida por la variabilidad y disparidad de las series I_{MF} , se produce en Bética, que muestra desarrollo temporal simultáneo a Meseta. Se detecta un incremento de variabilidad en la Bética durante el último treintenio. Por el contrario, la zona Cantábrico ofrece la mayor estabilidad, incrementándose esta con el transcurso del tiempo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto CGL2009-10683).

REFERENCIAS

- Arnoldus, H.M. J (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. En: De Boodt, M. y Gabriels, D. (Eds.). *Assessment of Erosion*. Wiley pp. 127-132.
- CEC. Commission of the European Communities. (1992). *CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community*. Luxembourg.
- Fournier, F. (1960). *Climat et érosion*. Ed. Presses Universitaires de France.
- García Barrón, L; Camarillo, JM; Morales, J y Sousa A. (2010). Caracterización pluviométrica intraanual de la Península Ibérica. En: Fdez. García F, Galán E, Cañada R (Eds.). *Clima, Ciudad y Ecosistemas*. Asociación Española de Climatología, pp. 389-398.
- García Barrón, L; Aguilar, M y Sousa A. (2011). "Evolution of annual rainfall irregularity in the southwest of the Iberian Peninsula". *Theoretical and Applied Climatology*, 103, pp 13-26.
- SIMPA. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente . On-Line: <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/descargas/series.jsp>

