

SEGMENTACIÓN AUTOMÁTICA DE LA RED FLUVIAL CON BASE GEOMORFOLÓGICA: UNA HERRAMIENTA UTIL EN LA RESTAURACIÓN DE RÍOS (RÍO PORMA, LEÓN)

Vanesa Martínez-Fernández*, Marta González del Tánago, Joaquín Solana-Gutiérrez y Diego García de Jalón

E.T.S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de

Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain

e-mail: vanesa.mfernandez@upm.es

Resumen

La segmentación automática del sistema fluvial con base geomorfológica puede ser una herramienta útil en la restauración de ríos. Tradicionalmente el criterio experto permitía identificar tramos fluviales homogéneos; sin embargo, existen métodos automáticos más objetivos y fiables favorecidos por avances en las técnicas de computación, en las tecnologías de sistemas de información geográfica y en la calidad de la información espacial. Se han aplicado métodos de segmentación automática a respuestas univariantes y multivariantes, basados en técnicas permutacionales y de randomización multi-respuesta sobre variables geomorfológicas sistemáticamente extraídas con la ayuda de sistemas de información geográfica. Se muestra la utilidad de esta herramienta en distintas fases de un proyecto de restauración, como son: la caracterización del contexto geomorfológico, la diagnosis del efecto de presiones sobre el sistema y la identificación de tramos preferentes para su conservación. Las técnicas descritas se han aplicado al río Porma (Cuenca del Duero, León) regulado desde 1968.

Palabras clave: Segmentación, tramo, restauración fluvial, regulación.

Abstract

Automatic segmentation of fluvial network based on geomorphology could be a useful tool in restoring rivers.

Traditionally expert criteria allowed to identify homogeneous river reaches; however, today more objective and reliable automated methods exist favoured by advances in computational techniques, technologies in geographic information systems and quality of spatial information. Methods of automatic segmentation with both univariate and multivariate application have been applied, that are based on permutation and randomization multi-response techniques and applied on geomorphologic variables systematically measured by using geographic information systems. The usefulness of this tool in some phases of a restoration project is considered, such as the characterization of geomorphologic context, the diagnosis of effects that some pressure cause on systems and the identification of interesting segments for conservation is displayed. Cited techniques have been applied to the Porma Rivera regulated since 1968.

Keywords: River segmentation, reach, river restoration, flow regulation.

1. Introducción

La identificación de tramos geomorfológicamente homogéneos en el continuo del sistema fluvial resulta indispensable para la interpretación de los procesos que operan y determinan su estado ecológico, así como para el diseño de las actuaciones de restauración y el seguimiento de sus efectos (Brenden *et al.*, 2008; Parker *et al.*, 2012; Gurnell *et al.*, 2014).

Tradicionalmente se han buscado discontinuidades en el sistema como vía para la clasificación del sistema fluvial, frecuentemente mediante criterio experto (Schumm *et al.*, 1994; Brierley y Fryirs, 2000; Seelbach *et al.*, 2006) con el inconveniente de presentar cierta subjetividad, carecer de reproducibilidad y nivel de significación. Se requieren otras herramientas que permitan solventar el problema con objetividad siendo muy útil considerarlo como un problema estadístico.

En la actualidad, dada la gran cantidad de información espacial existente y disponible; como la disponibilidad de modelos digitales del terreno y ortofotos de gran resolución, el avance en la tecnología de sistemas de información geográfica (SIG) y en métodos de captura de datos (LIDAR), y el desarrollo de modelos hidráulicos e hidrológicos que permiten simular diferentes condiciones; se proponen otros sistemas de delineación que buscan lograr mayor objetividad apoyados en una sólida base estadística. Existen

procedimientos automáticos objetivos y fiables, que aportan numerosas ventajas en este campo (Alber y Piégay, 2011, Parker *et al.*, 2012, Bizzi and Lerner, 2012). Así, se consigue delimitar unidades internamente homogéneas y adyacentemente diferentes de forma significativa (segmentación automática), ya sea en series de datos univariantes o multivariantes.

Entre los métodos automáticos la mayoría de las aplicaciones en sistemas fluviales han sido univariantes. Alber y Piégay (2011) detectaron discontinuidades en la cuenca del Ródano (Francia) en base a la anchura del valle y por otro lado en base a la anchura del cauce mediante la aplicación del test de Pettitt (Pettitt, 1979), test que también fue utilizado para detectar discontinuidades en base a la anchura de la llanura de inundación en la misma cuenca (Notebaert y Piégay, 2013). Parker *et al.* (2012) delimitaron tramos homogéneos en el río Taff (Reino Unido) en base al transporte de sedimentos previamente modelizado utilizando análisis de varianza. Este tipo de segmentaciones univariantes puede ser muy útil como primer paso en una caracterización geomorfológica, pero siempre teniendo en cuenta que dependiendo del objetivo habría que elegir la variable de manera adecuada. Aunque de forma menos frecuente, los métodos multivariantes también se han empleado en el contexto fluvial, ofreciendo una visión integradora del contexto del río que se esté analizando. Por ejemplo, Brenden *et al.* (2008) diseñaron un método de agrupación restringida espacialmente (*cluster*) que posteriormente utilizaron para considerar tramos internamente similares en base a siete atributos físico-químicos que consideraban determinantes de la composición piscícola de una cuenca. Bizzi y Lerner (2012) caracterizaron tipos de tramos en el río Lune (Reino Unido) a partir de la delimitación de tramos internamente homogéneos en base a variables hidrogeomorfológicas (orden de Strahler, pendiente del cauce, área de la llanura de inundación, caudal medio anual y anchura del cauce, algunas de ellas inferidas).

Como se extrae de lo anterior, el problema de la delineación de tramos homogéneos en base a una o ciertas variables continúa en desarrollo y ha sido aplicado con mayor frecuencia sobre variables geomorfológicas. Para ello, en general se hacen mediciones de forma sistemática a lo largo del eje fluvial con ayuda de sistemas de información geográfica (SIG) sobre fotografía aérea y modelos digitales del terreno. Estas técnicas digitales tienen la ventaja de permitir abarcar grandes áreas de estudio con un esfuerzo moderado. Las técnicas de medición pasan por delimitar los elementos geográficos necesarios para hacer las mediciones (por ejemplo digitalización del fondo de valle, del cauce activo, de la llanura de inundación, etc.), decidir el intervalo de muestreo y finalmente llevar a cabo la medición. Además, los avances en las técnicas de gestión de datos ya permiten realizar algunas de estas tareas automáticamente evitando así la digitalización manual (Lee *et al.*, 2009; Pai y Saraswat, 2013). Sin embargo, la aplicación de algoritmos para segmentar el sistema sería igualmente válida cuando se trata de variables físicoquímicas del agua (Brenden *et al.* 2008) o incluso variables bióticas del sistema. El inconveniente en este caso reside en la dificultad para disponer de este tipo de datos (calidad de aguas, temperatura del agua, presencia de fauna acuática, composición de la ribera, etc.) en cantidad y calidad suficiente a lo largo del continuo del río.

Considerando estas necesidades del método en cuanto a la cantidad de datos y dificultad para obtenerlos, delimitar tramos homogéneos de manera objetiva puede ser útil: (1) en la caracterización del contexto geomorfológico de un sistema fluvial gracias a la consideración y caracterización de tramos significativamente diferentes; (2) en la diagnosis del efecto que tienen algunas presiones sobre las características del sistema, tarea que puede basarse en el análisis temporal valorando el cambio en la disposición de los tramos hallados con idéntica metodología (intervalo de muestreo y significación exigida); (3) en la identificación de tramos preferentes para su conservación al presentar cierto nivel de calidad en sus características evaluadas en el método. Estas tareas proporcionan información muy valiosa para el diseño de intervenciones en un sistema fluvial, ya sea con objetivo de restauración o conservación (González del Tánago y García de Jalón, 2007).

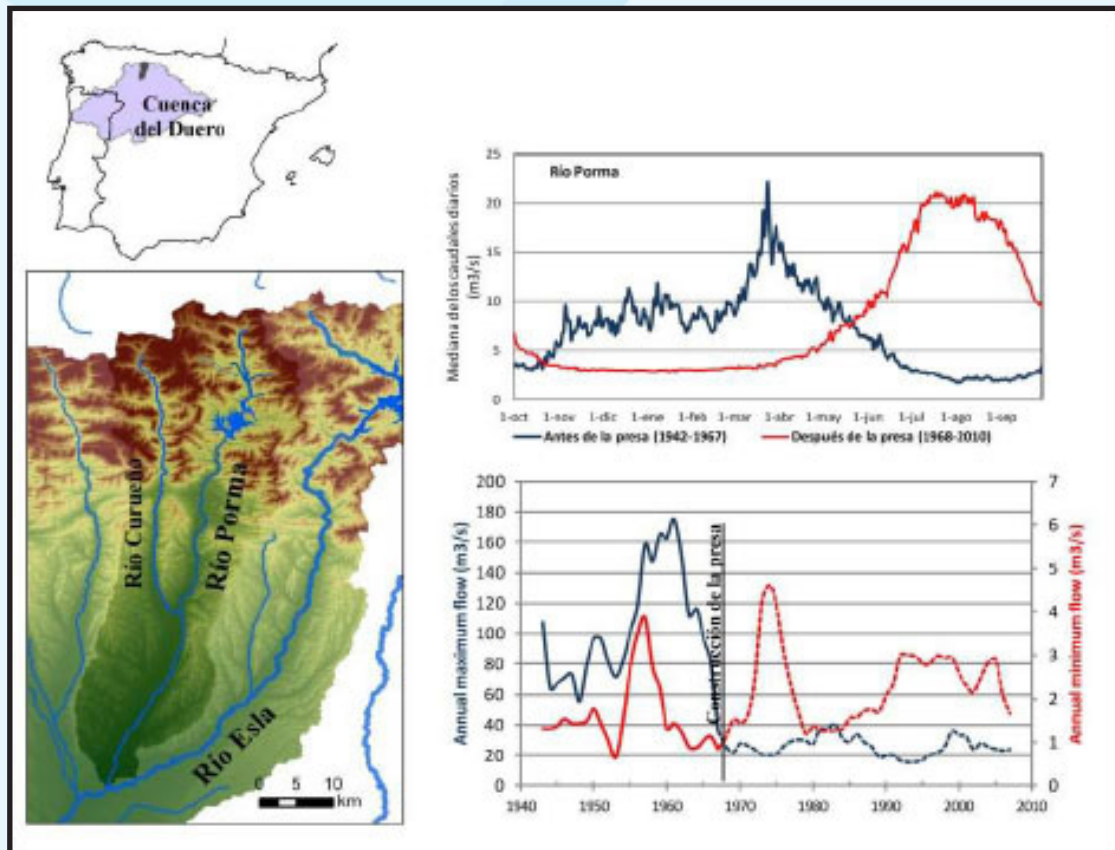
En este trabajo se presenta la aplicación de un Procedimiento de Permutación Multi- Respuesta (*Multi-Response Permutation Procedures*, Mielke 1991), que permite la delimitación de tramos internamente homogéneos y significativamente diferentes de los contiguos tanto de manera univariante como multivariante. El método se ha aplicado en el río Porma (Cuenca del Duero) afectado de regulación desde 1968. Se muestra la utilidad del procedimiento seguido, así como el potencial de aplicación para el diagnóstico de los efectos de la regulación de los caudales en la geomorfología de los cauces fluviales y el diseño de su restauración.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El río Porma es un afluente por la margen derecha del Río Esla (Figura 1). Presenta una cuenca vertiente de 1.150 km² y discurre en dirección Norte-Sur desde la Cordillera Cantábrica a su desembocadura en el Río Esla, en un rango altitudinal que va desde los 1800 hasta los 770 m. Su caudal está regulado desde 1968 con la construcción y puesta en funcionamiento de la presa de Vegamián.

Figura 1. Localización de la zona de estudio y características del régimen de caudales antes y después de la construcción de la presa.



Desde que se construyera la presa los caudales máximos anuales han disminuido un 80 %, pasando de ser 118.4 m³/s en el periodo 1956-1967 a ser 22.7 m³/s en las últimas décadas (1988-2009); mientras que los caudales mínimos anuales se han duplicado, 1.12 m³/s en el periodo 1956-1967 y 2.50 en el periodo 1988-2009, y los medios disminuyen en menor medida, 11.2 m³/s en 1959-1968 y 8.2 m³/s en 1988-2009 (Figura 1) (valores calculados a partir de los datos de la estación de aforos con código 2011 emplazada aguas abajo del embalse, <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>). Su principal afluente es el río Curueño, que tiene un régimen más natural al carecer de un embalse en su cabecera, aunque existe un pequeño trasvase que se utiliza en ciertas ocasiones. La metodología se aplicó a la parte del río Porma comprendida entre la presa y su desembocadura en el río Esla, en una longitud de río de 65 km.

2.2 Producción de datos

Los tramos se han delimitado en base a tres variables geomorfológicas relacionadas con los procesos fluviales comúnmente utilizadas en análisis espacial de redes hidrográficas (Fryirs y Brierley, 2012; Kondolf *et al.*, 2003): la anchura del fondo del valle, la anchura del cauce activo (combinando barras desnudas de gravas y superficie cubierta por el agua) y la pendiente del cauce. Primero se digitalizaron manualmente el fondo de valle, el cauce activo y el trazado del eje fluvial en sistema de información geográfica (ESRI Arc-Map versión 9.3), combinando la información del modelo digital del terreno con resolución de 5 m y fecha 2010 (www.ign.es), foto aérea del año 1956 y ortofotos actuales del año 2011. En intervalo de medición de

las tres variables fue 200 m.

2.3 Método aplicado

Para realizar la segmentación del río en tramos significativamente diferentes se ha aplicado un método de Permutación Multi-Respuesta, a partir de ahora MRPP. Es un método no paramétrico que permite clasificar el sistema en tramos estadísticamente significativos en base a la información que proporcionan una (aplicación univariante) o más variables (aplicación multivariante) del sistema (Mielke, 1991; Orłowski *et al.*; 1993).

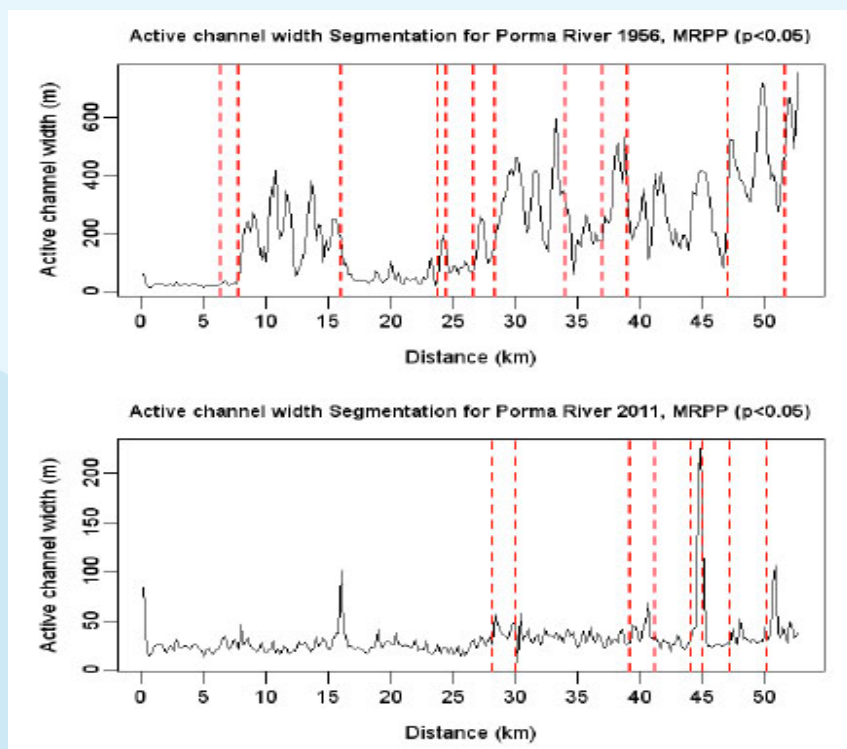
El MRPP se ha aplicado de forma univariante a la anchura del cauce activo del Río Porma en los años 1956 y 2011 para analizar los cambios en la segmentación, teniendo en cuenta que la construcción de la presa juega un papel muy importante en esta variable. También se ha aplicado de forma multivariante a las variables anchura del valle, anchura del cauce activo y pendiente del cauce en el mismo río.

3. Resultados y Discusión

3.1 Aplicación univariante en el periodo 1956-2011

En la figura 2 se muestran las segmentaciones del Río Porma en base a la variable anchura del cauce activo en el año 1956 y 2011. El estrechamiento del cauce, 178.5 m de anchura mediana en 1956 y 26.9 m en 2011; así como su homogeneización, disminución de la oscilación de la variable, son visualmente apreciables. La observación de la segmentación significativa del río permite hacer una serie de comentarios. En primer lugar, el número de segmentos disminuye pasando de ser 13 en 1956 a ser 9 en 2011, lo cual cuantifica la homogeneización producida en la variable a lo largo del periodo ya que no se pueden establecer tantos grupos significativamente diferentes como se establecían con los datos de 1956. A su vez, la localización de los segmentos y el cambio producido permiten determinar dónde han tenido lugar las principales diferencias (Figuras 2 y 3).

Figura 2. Segmentaciones obtenidas en base a la anchura del cauce activo del año 1956 (superior) y 2011 (inferior). En negro se representa la variación de la anchura del cauce a lo largo de la distancia y con líneas discontinuas rojas los límites detectados por el algoritmo (MRPP, $p < 0.05$)



La pérdida de discontinuidades detectadas es total hasta la confluencia con el Río Curueño, producida en torno al km 28, ya que los 7 segmentos detectados en 1956, que presentaban anchuras máximas incluso por encima de 400 m, pasan a formar un único tramo en 2011 presentando raramente valores de 100 m. El estrechamiento no se ha producido por igual en esos 28 km, ya que las partes comprendidas del inicio hasta el kilómetro 8 y la parte desde el kilómetro 16 hasta el 24 prácticamente se mantienen. Sin embargo, el acusado estrechamiento que se produce en el resto conduce a la homogeneización y a la detección significativa de un solo segmento.

La regulación del caudal que presenta el río Porma, da lugar a una disminución tanto de las avenidas geomorfológicamente activas capaces de mantener las dimensiones de cauce como del aporte de sedimentos que ahora son atrapados por la presa, circunstancias ya observadas por varios autores en otros ríos (Graf, 2006; Schmidt and Wilcock, 2008). Este ha podido ser el principal agente que ha homogeneizado el cauce en el tramo alto del Porma. La segmentación automática del sistema, concretamente los resultados proporcionados en el tramo alto (entre el embalse y la confluencia con el Río Curueño) contribuyen a la diagnosis de los efectos de la regulación de los caudales en la geomorfología del cauce. Por ejemplo, en la figura 4 se observa el aspecto que presentaba la transición entre los segmentos 3 y 4 en 1956, donde destacan las mayores dimensiones y variabilidad en las anchuras de cauce activo respecto a la actualidad, así como una mayor complejidad en el trazado pasando de ser trezado a ser un tramo de baja sinuosidad en la actualidad. La aparente homogeneización que se produce en este tramo alto del río Porma (entre embalse y confluencia) hace que en el cauce activo de 2011 no se detecten tramos significativamente diferentes, de manera que el sistema se reduce a la consideración de un único tramo. En este caso, la mejora de las condiciones hidrológicas, con el fomento de la ocurrencia de ciertas avenidas y aporte de sedimentos que contribuiría a la restauración de los procesos naturales, favorecería la recuperación de una parte de la diversidad inicial de anchuras de cauce activo en el tramo alto del río Porma.

Figura 3. Diagrama de representación de características métricas de la anchura del cauce activo de cada segmento (valores máximo, mediano, mínimo y coeficiente de variación). En la parte positiva de ordenadas se presenta lo correspondiente a la segmentación en 1956 (azul) y en la parte negativa lo correspondiente a la segmentación en 2011 (verde). La primera línea de abscisas hace referencia al punto kilométrico en que finaliza cada segmento, la segunda y tercera corresponden a la denominación del segmento en las segmentaciones de 1956 y 2011 respectivamente

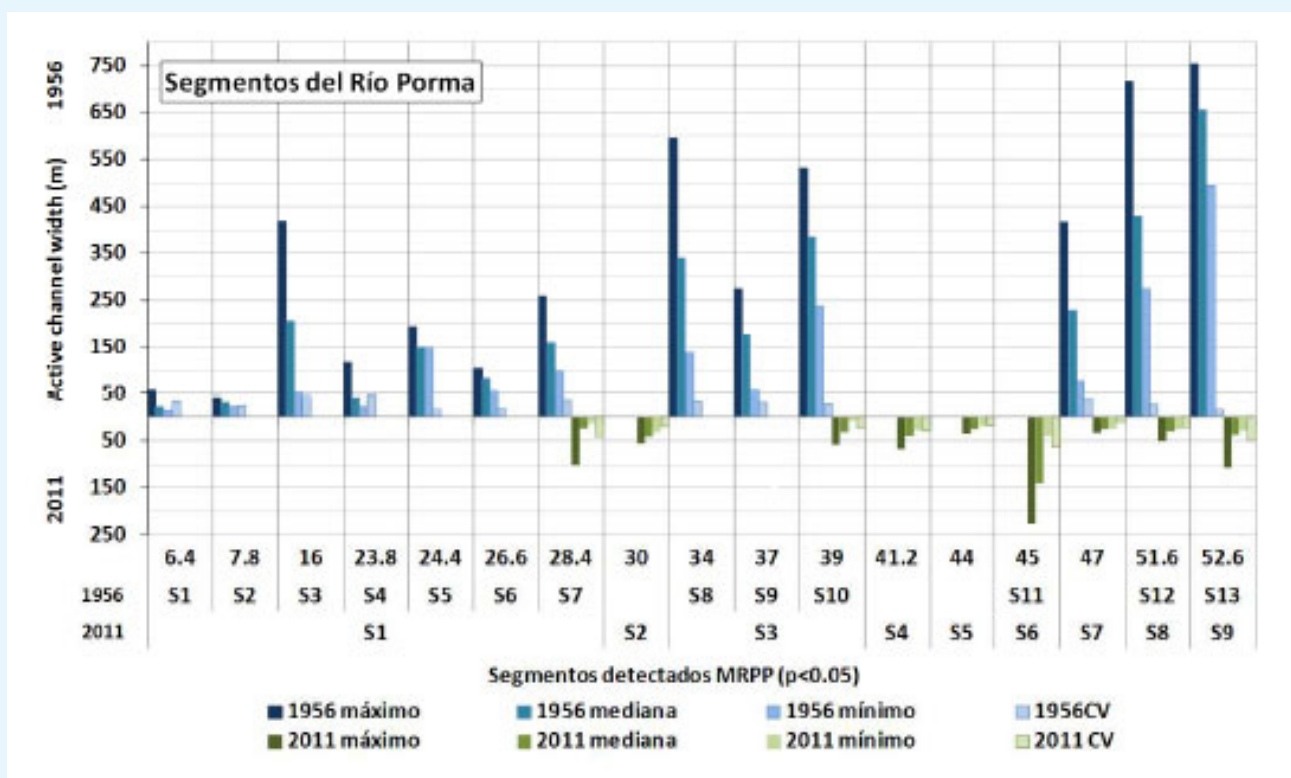
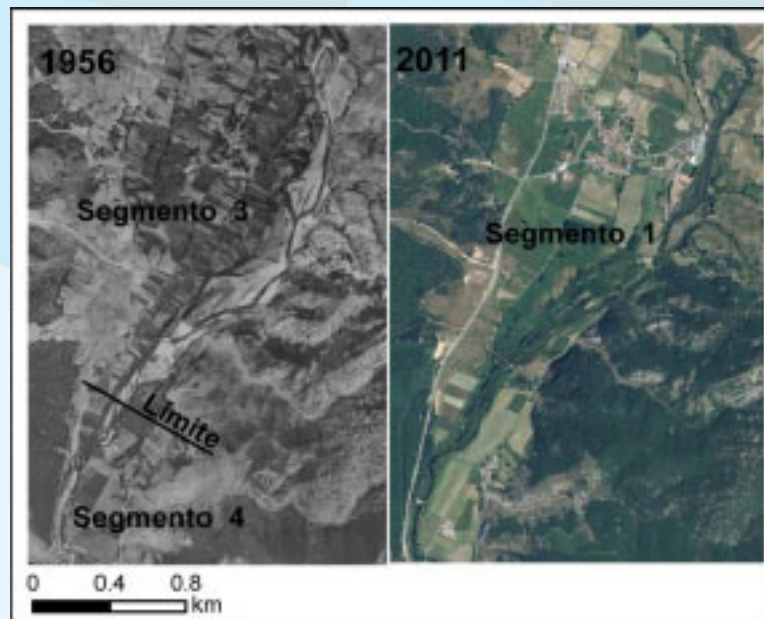


Figura 4. Transición entre el segmento 3 y 4 del Río Porma en 1956 (izquierda) y aspecto del mismo enclave en 2011 donde actualmente no se detectan cambios significativos (derecha)



Agua abajo de la confluencia con el río Curueño, aunque se mantiene la localización de los dos últimos segmentos, presentando en 2011 anchuras medianas y máximas muy inferiores respecto al año 1956 (Figuras 2 y 3), en general se observa un estrechamiento del cauce y una disminución de la variabilidad. Por ejemplo los segmentos 8, 9 y 10 de 1956 pasan a formar un único segmento 3 en 2011. Por otro lado, el segmento 11 de 1956, pasa a dividirse en cuatro, segmentos del 4 al 7 de 2011 al mantenerse una zona con mucha anchura (>200 m) que se diferencia significativamente del resto.

La confluencia con el río Curueño, que todavía hoy presenta un régimen de caudales con frecuentes avenidas, podría mitigar el efecto regulador de la presa. Dotando de cierto dinamismo a la parte baja del Porma, la entrada de caudales más naturales favorecería la diversidad de anchuras de cauce, hecho que la segmentación significativa pone de manifiesto al detectar varios segmentos, aunque el estrechamiento haya sido muy elevado (Figura 2 y 3). Algunos factores que explicarían el estrechamiento tan acusado en el cauce del río Porma, además de la regulación de caudales que tiene lugar desde 1968, podría ser la disminución generalizada del agua en la cuenca evidenciada por la disminución aunque leve de los caudales medios anuales (Figura 1) cuya causa podría deberse al aumento de la cubierta forestal (arbórea y de matorral) en la cuenca (Morán Tejeda *et al.*, 2012, Martínez-Fernández *et al.*, 2014) y a otros factores climáticos no considerados en este estudio.

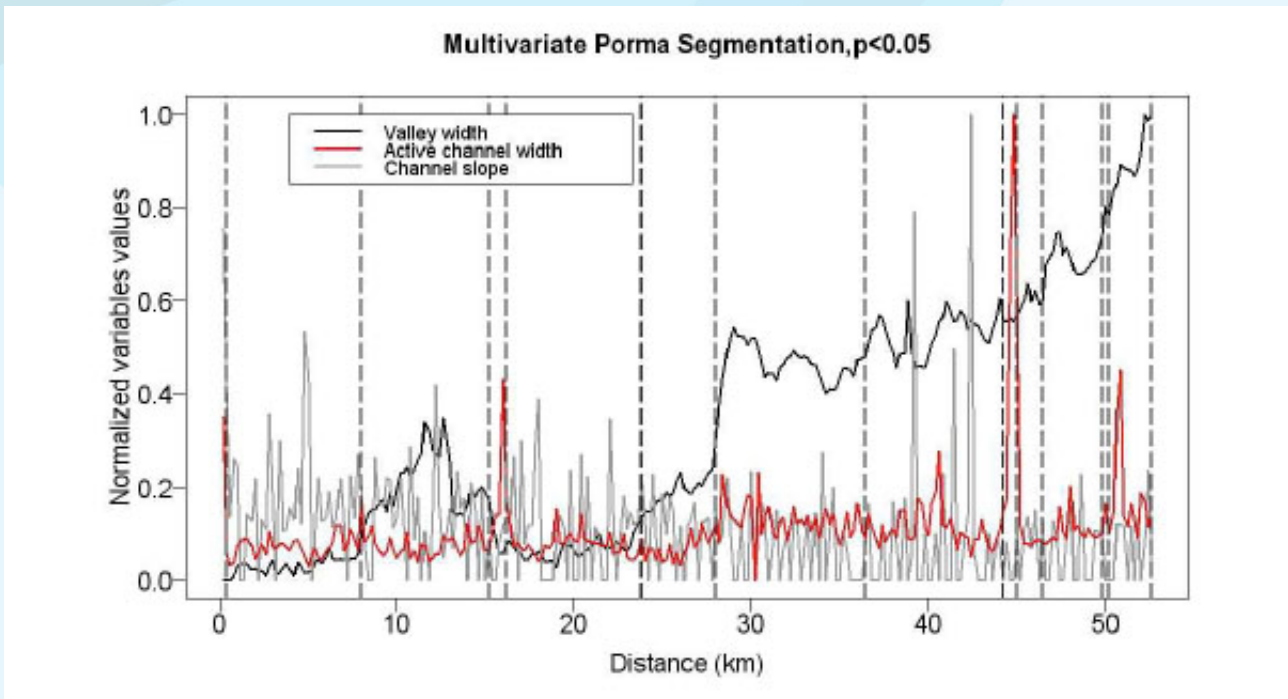
Aquellos segmentos que, aún habiéndose estrechado, conserven variabilidad en las formaciones podrían ser candidatos a conservar en buen estado ecológico, fomentando el mantenimiento de la dinámica actual e incluso impulsando su evolución hacia estados más naturales

3.2 . Aplicación multivariante (2011)

La segmentación multivariante obtenida en base a los datos de 2011 se presenta en la figura 5.

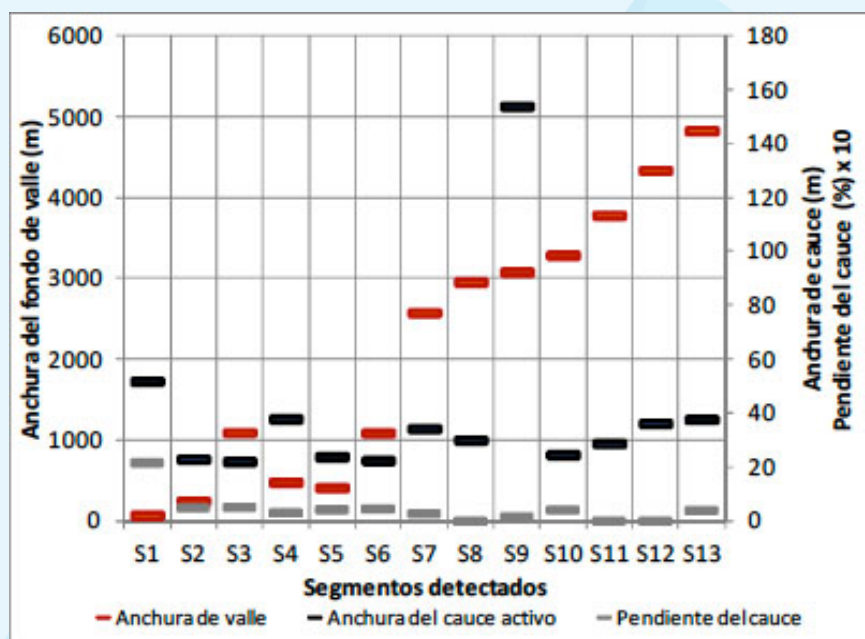
A lo largo del sistema fluvial se detectan 13 segmentos en base a las variables anchura del fondo de valle, anchura del cauce activo y pendiente del cauce. Se detectan algunos segmentos muy cortos como por ejemplo el primero, el cuarto y el noveno en relación aparente a incrementos locales en la anchura del cauce activo, y otros más largos como el séptimo y octavo con valores más estables en las tres variables.

Figura 5. Segmentación obtenida en base a la anchura del fondo de valle, la anchura del cauce activo y la pendiente del cauce en 2011. En negro se representa la anchura del valle, en rojo la anchura del cauce activo y en gris la pendiente del cauce a lo largo de la distancia. Con líneas verticales discontinuas se representan los límites detectados por el algoritmo (MRPP, $p < 0.05$).



Una vez realizada la segmentación, mediante el método automático, la caracterización de cada segmento permite entender el contexto geomorfológico del sistema fluvial. Los segmentos 1 y 2 presentan pendientes más altas que el resto, produciéndose una disminución continua que se incrementa de nuevo en los segmentos 10 y 13. Los segmentos 1, 2, 4 y 5 se caracterizan por presentar un valle estrecho que condiciona el ajuste del cauce. Mientras que en los segmentos posteriores la mayor anchura del valle permitiría el desarrollo de un cauce más ancho y complejo que el actual, como ya lo fuera en el pasado (Figuras 2 y 3).

Figura 6. Representación de los valores medianos de las tres variables en cada segmento que caracteriza el sistema fluvial



4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo, se ha mostrado cómo la segmentación automática puede ser una herramienta objetiva en algunas fases dentro de las iniciativas de restauración de ríos. Estas fases podrían ser la caracterización del sistema, la diagnosis de los efectos de ciertas presiones, como ha sido en este caso la regulación de caudales, la búsqueda de tramos interesantes para su conservación o restauración. A través de la comparación con situaciones previas del río o con sistemas fluviales más naturales de la misma tipología se podría también contribuir al establecimiento de una imagen objetivo, tarea necesaria en cualquier iniciativa de restauración.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través de una beca de Formación del Profesorado Universitario concedida a Vanesa Martínez Fernández (BOE-A-2014-9081). Los autores también quieren agradecer al proyecto REFORM desarrollado bajo el 7º Programa Marco de la Unión Europea (contrato nº 282656).

Referencias

- Alber, A., Piégay, H. (2011) Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: application to the Rhône basin (France). *Geomorphology* 125 (3): 343–360
- Bizzi, S., Lerner, D. N. (2012) Characterizing physical habitats in rivers using map-derived drivers of fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*, 169: 64–73.
- Brenden, T.O., Wang, L., Seelbach, P.W., Clark, R.D., Wiley, M.J., Sparks-Jackson, B.L. (2008) A spatially constrained clustering program for river valley segment delineation from GIS digital river networks. *Environmental Modelling and Software* 23: 638–649.
- Brierley, G.J., Fryirs, K.A. (2000) River styles, a geomorphic approach to catchment characterization: implications for river rehabilitation in Bega catchment, New South Wales, Australia. *Environmental Management* 25: 661–679.
- Fryirs, K.A., Brierley, G.J. (2012) *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*. John Wiley & Sons. 345 p.
- González del Tánago, M., García de Jalón, D. (2007) *Restauración de Ríos. Guía metodológica para la elaboración de proyectos*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 318 p.
- Graf, W.L. (2006) Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79: 336–360.
- Gurnell A.M., Bussettini, M., Camenen, B., González Del Tánago, M., Grabowski, R.C., Hendriks, D., Henshaw, A., Latapie, A., Rinaldi, M., Surian, N. (2014) A multi-scale framework and indicators of hydromorphological processes and forms. Deliverable 2.1, Part 1, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piégay, H., Schmitt, L. (2003) Geomorphic classification of rivers and streams. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. J. Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 169–202.
- Lee, I., Wu, B., Li, R. (2009) Shoreline Extraction from the Integration of LiDAR Point Cloud Data and Aerial Orthophotos Using Mean Shift Segmentation. In: *Proceedings ASPRS 2009 Annual Conference*. ASPRS, Baltimore, MD.
- Martínez-Fernández, V., González del Tánago, M., Maroto de Mercado, J., García de Jalón, D. (2014) Flow regulation and vegetation changes in gravel bed rivers (Upper Esla river, NW Spain). (10th *International Symposium on Ecohydraulics 2014*). Trondheim, Noruega, Junio 23-27, 2014.

- Mielke, P.W. (1991) The application of multivariate permutation methods based on distance functions in the earth sciences. *Earth-Science Review* 31: 55–71.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J. M., López-Moreno, J. I. (2012) Land-cover changes and recent hydrological evolution in the Duero Basin (Spain). *Regional Environmental Change*, 12(1): 17-33
- Notebaert, B., Piégay, H. (2013) Multi-scale factors controlling the pattern of floodplain width at a network scale: The case of the Rhône basin, France. *Geomorphology*, 200: 155- 171.
- Orlowski, L.A., Grundy, W.D., Mielke Jr, P.W., Schumm, S.A. (1993) Geological applications of multi-response permutation procedures. *Mathematical geology*, 25(4): 483- 500.
- Pai, N., Saraswat, D. (2013) A geospatial tool for delineating streambanks. *Environmental Modelling & Software*, 40: 151-159.
- Parker, C., Clifford, N.J., Thorne, C. R. (2012) Automatic delineation of functional river reach boundaries for river research and applications. *River Research and Applications*, 28(10): 1708-1725.
- Pettitt, A.N. (1979) A non-parametric approach of the change-point problem. *Applied Statistics* 28 (2): 126–135.
- Schumm, S.A., Rutherford, I. and Brooks, J. (1994) Pre-Cutoff Morphology of the lower Mississippi River. In: S.A. Schumm and B.R. Winkley (eds.), *The Variability of Large alluvial Rivers*. American Society of Civil Engineers, New York.
- Seelbach, P.W., Wiley, M.J., Baker, M.E., Wehrly, K.E. (2006) Initial classification of river valley segments across Michigan's lowers peninsula. En: Hughes, R.M., Wang, L., Seelbach, P.W. (eds.), *Landscape Influences on Stream Habitats and Biological Assemblages*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp. 25 - 48.
- Schmidt, J.C., Wilcock, P.R. (2008) Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research* 44(4).