

LA INVESTIGACIÓN HIDROGEOMORFOLÓGICA EN CUENCAS EXPERIMENTALES DE MONTAÑA MEDIA EN EL PIRINEO CENTRAL (1996-2014)

D. REGÜÉS¹, N. LANA-RENAULT², E. NADAL-ROMERO³, P. SERRANO-MUELA¹

¹ Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Avda. Montañana 1005, Zaragoza 50.059. dregues@ipe.csic.es

² Departamento de Ciencias Humanas. Universidad de La Rioja, Logroño

³ Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics. University of Amsterdam, Amsterdam

RESUMEN

Los estudios hidrogeomorfológicos en cuencas experimentales de montaña media del Pirineo Central se iniciaron en 1996 en Arnás (valle de Borau) y en 1998 en San Salvador (valle de Aísa). En 2005 se instaló una estación de aforo en la salida del barranco de Araguás (Depresión Interior Altoaragonesa) y en 2011 se construyó un canal de aforo en la zona media de la misma cuenca. Los estudios han dado lugar a 3 Tesis Doctorales, 2 libros, una gran cantidad de artículos científicos y capítulos de libros monográficos. Los resultados han permitido comparar objetivamente la producción de agua y sedimento en cuatro escenarios muy diferenciados de usos del suelo y características de la cubierta vegetal.

Palabras clave: *Cuencas experimentales, montaña media, hidrología, geomorfología, producción de sedimento, usos del suelo.*

ABSTRACT

The hydro-geomorphologic research in the experimental catchments in the middle mountain of the Central Pyrenees started in 1996 in Arnás (Borau Valley) and in 1998 in San Salvador (Aísa valley). In 2005 a gauging station was installed at the outlet of Araguás catchment (Inner Depression) and in 2011 a flume channel was built in the middle area of the same catchment. The studies have generated 3 PhD dissertations, 2 books, and a high amount of scientific articles and books chapters. The results have allowed comparing objectively the water and sediment yield from four very different land uses and vegetation covers.

Key words: *Experimental catchments, middle mountain, hydrology, geomorphology, sediment yield, land uses.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los estudios pioneros en cuencas experimentales

La investigación en cuencas experimentales ha sido fundamental para el estudio hidrológico en distintos usos del

suelo y tipos de cubierta vegetal. Las primeras investigaciones se inician a principios del S. XX en los Alpes suizos (Engler, 1919) y algo más tarde en Estados Unidos (Bates & Henry, 1928), pero durante un tiempo se dudó de su fiabilidad y utilidad (Hewlett *et al.*, 1969). Sin embargo, a par-

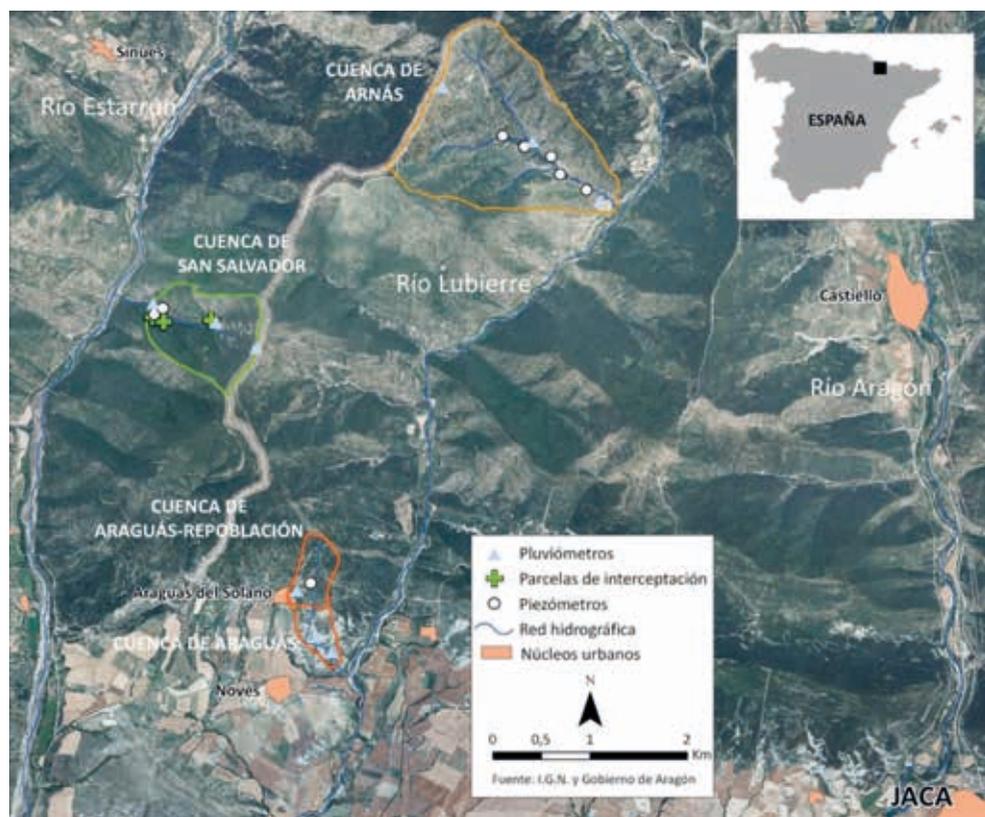


Figura 1. Situación de las cuencas experimentales del Pirineo central.

tir de la “Década Hidrológica Internacional (1965-1974)” declarada por la UNESCO (Leclerc, 1992) los estudios en cuencas experimentaron un fuerte impulso. Así, Hewlett (1982) realiza uno de los primeros estudios sobre el efecto hidrológico de los cambios de cubierta vegetal. La consolidación definitiva viene asociada a la creación de la “European Network of Experimental and Representative Basins, ERB” (Dubreuil, 1989). En España estos estudios se inician a finales de la década de 1980, creándose también una “Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación-RESEL” (García-Ruiz & Gallart, 1997).

1.2. Las cuencas experimentales del Pirineo

En 1986-87 se monitoriza la cuenca experimental de Izas en la alta montaña del Pirineo central (Martínez-Castroviejo *et al.*, 1991; White *et al.*, 1997). En 1989 se inicia el primer estudio en la cuenca de Vallcebre en el Pirineo oriental (Llorens & Gallart, 1992) que después se amplía a un conjunto de cuencas integradas (Gallart *et al.*, 2002). Las cuencas experimentales de montaña media en el Pirineo central se monitorizaron desde 1996 (García-Ruiz & López-Bermúdez, 2009) y fueron seleccionadas en usos del suelo representativos en esta parte de los

Pirineos: bosque natural (cuenca de San Salvador), ocupación vegetal espontánea en campos abandonados (cuenca de Arnás), repoblación forestal en campos abandonados (cuenca de Araguás repoblación) y cárcavas desarrolladas en un ambiente intensamente alterado (cuenca de Araguás). En este trabajo se relatan cronológicamente los principales estudios realizados en estas cuatro cuencas a lo largo de 15 años.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Las cuencas experimentales de Arnás, San Salvador y Araguás se encuentran en el margen norte de la Depresión Interior Altoaragonesa, en el sector de cabecera de la red hidrográfica del río Aragón (Figura 1) siendo tributarias de los ríos Lubierra (Arnás y Araguás) y Estarrún (San Salvador). Topográficamente se sitúan en montaña media, con ligeras diferencias entre ellas: Araguás (780-1105 m s.n.m.), San Salvador (830-1295 m s.n.m.) y Arnás (910-1340 m s.n.m.).

El clima de la zona es Mediterráneo, pero con ciertos matices debidos a la altitud y la influencia de tipo continental y atlántico. La precipitación media es de 900 mm año⁻¹ con una amplia variación interanual (± 250 mm año⁻¹) y la temperatura media anual es de 10°C.

El substrato está formado por turbiditas del Flysch Eoceno pirenaico aunque el sector sur de la cuenca de Araguás está sobre las denominadas margas de Larrés de edad Eocena, donde predomina la presencia de cárcavas (Nadal-Romero *et al.*, 2006).

La cuenca de San Salvador presenta el 95% de su superficie cubierta por bosques

de *P. sylvestris* y *F. sylvatica* en umbría y de *P. sylvestris* y *Q. faginea* en solana. Los suelos en ladera norte son Kastanozem o Phaeozem y presentan mayor desarrollo y profundidad que los Regosoles y Cambisol de la ladera sur (Serrano-Muela, 2012). La cuenca de Arnás presenta una cubierta vegetal irregular, propia de un ambiente afectado por el abandono de cultivos en fase de recolonización vegetal. En la vertiente norte predomina la cubierta forestal de *P. sylvestris*, mientras en la sur domina la cubierta arbustiva de *B. sempervirens*. Esta diferencia también se aprecia en los suelos, en umbría son Calcisoles, Cambisoles y Luvisoles profundos y desarrollados, mientras en solana son Regosoles más degradados (Lana-Renault, 2008 y 2011). La cuenca de Araguás presenta el mayor contraste de cubierta vegetal, en el sector inferior la capacidad de colonización vegetal está limitada por la dinámica de las cárcavas, el sector medio presenta prados y matorral (*B. sempervirens* y *G. scorpius*) y la parte alta está ocupada por un bosque de repoblación (*P. nigra* y *P. sylvestris*) sobre terrazas abandonadas. Los suelos en la zona baja de la cuenca son básicamente Regosoles muy pobres y en la zona media-alta son Cambisoles y Regosoles (Nadal-Romero, 2008 y 2011).

3. EVOLUCIÓN CRONOLÓGICA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

La monitorización de las cuencas experimentales del Pirineo Central se produjo en dos etapas. Una fase inicial (1996-1998) en la que se planificó analizar el efecto del abandono de cultivos sobre la respuesta hidrológica y la erosión en las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador. Una segunda fase (2003-2012) en la que

se amplió el dispositivo experimental de dichas cuencas y se incorporó la cuenca de Araguás, con el objetivo de analizar la dinámica geomorfológica y la hidrología de una zona acarcavada. En 2007 se decidió estudiar la respuesta hidrológica en el bosque de repoblación del sector norte de Araguás, cuya monitorización continúa en la actualidad.

3.1. Etapa inicial de monitorización (1996-1998)

Arnás (2,84 km²): En 1996 se instaló un canal de aforo con vertedero en H, equipado para el registro continuo del caudal (sonda de nivel por ultrasonidos) y el sedimento en suspensión (turbidímetro y muestreador automático). En el canal de aforo hay una trampa (0,5 m³) para retener el sedimento en carga de fondo. También se instaló una estación meteorológica completa y dos pluviómetros de balancín (Lana-Renault, 2008 y 2011).

San Salvador (0,92 km²): En 1998 se instaló el canal de aforo con vertedero en forma de H, equipado con instrumentos similares al aforador de Arnás. Asimismo se instaló una estación meteorológica completa y un pluviómetro de balancín (Serrano-Muela, 2012).

3.2. Segunda fase de monitorización (2003-2014)

Esta fase comenzó con una ampliación del dispositivo experimental en Arnás y San Salvador (2003-2007). En Arnás se añadió una sonda de presión para el registro del caudal en el aforador, un pluviómetro de balancín en la zona media de la cuenca, siete piezómetros repartidos a lo largo de la zona media-baja de la cuenca y también se preparó un dispositivo para

estimar el transporte por carga de fondo (Lana-Renault, 2008 y 2011). En la cuenca de San Salvador se instaló una sonda de presión para el registro del caudal en el aforador, dos pluviómetros de balancín (zonas media y alta de la cuenca), dos piezómetros en la zona baja de la cuenca (laderas norte y sur) y tres parcelas para el estudio de trascolación y escorrentía cortical (Serrano-Muela, 2012).

Araguás (0,45 km²): en 2004 se monitorizaron dos parcelas para estudiar la meteorización del regolito y en 2005 se instaló un canal de aforo con vertedero en H, que incluyó un canal de estiaje. El aforador fue equipado con instrumentos similares a las cuencas de Arnás y San Salvador (nivel de agua y transporte de sedimento en suspensión) aunque el sensor de turbidez (Hendress+Hauser CUS41-W2) permite estimar concentraciones muy elevadas. Asimismo, se instalaron tres pluviómetros en el sector medio-bajo de la cuenca (Nadal-Romero, 2008 y 2011).

Araguás Repoblación (0,12 km²): en 2007 se situó una sonda de presión en el cauce de salida de la zona reforestada, que proporcionó una aproximación del caudal (Nadal-Romero *et al.*, 2010). Entre 2011 y 2012 se instaló un aforador con vertedero en V y desde marzo de 2014 la cuenca se ha equipado con dos pluviómetros de balancín y dos piezómetros en el sector bajo-medio.

4. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA GENERADA EN LAS CUENCAS EXPERIMENTALES DEL PIRINEO CENTRAL

4.1. Los primeros estudios (1998-2002)

La investigación inicial en las cuencas experimentales del Pirineo Central se fi-

nanció con los proyectos EPROHIDRO, HI-DROESCALA y RESEL, asociados al estudio de la producción de agua y sedimento en relación con el uso del suelo y la cubierta vegetal. Los resultados obtenidos en Arnás y San Salvador permitieron identificar los factores determinantes en la respuesta hidrológica y del sedimento (González *et al.*, 1997; García-Ruiz *et al.*, 2000).

Durante esta primera etapa la responsabilidad de las cuencas experimentales la asumió el doctor José María García Ruiz, aunque contó con el apoyo de varios compañeros del IPE. La puesta a punto de las instalaciones implicó un gran esfuerzo recompensado por la calidad de la información obtenida, que animó a continuar la investigación en ambas cuencas. Con este propósito el Dr. García Ruiz planificó el desarrollo de una Tesis Doctoral en las dos cuencas experimentales.

4.2. El máximo desarrollo de la investigación en las cuencas experimentales (2003-2008)

A partir del año 2003 la investigación en las cuencas recibió un impulso definitivo, que afectó en primer lugar a la cuenca experimental de Arnás. Esto se explica por tres causas: (i) la financiación proporcionada por el proyecto PIRIHEROS liderado por el Dr. García Ruiz; (ii) la incorporación del Dr. David Regüés Muñoz al IPE como nuevo investigador de plantilla y con experiencia adquirida en los estudios realizados en las cuencas experimentales de Vallcebre (Pirineo oriental); (iii) la beca predoctoral conseguida por Noemí Lana-Renault Monreal para realizar una Tesis Doctoral bajo la dirección de los doctores García-Ruiz y Regüés. A partir de este momento se intensifica la actividad de inves-

tigación en la cuenca de Arnás, mediante la calibración e incorporación de nuevos instrumentos mencionada en el apartado 3.2, la revisión de las sondas disponibles y la aplicación de las técnicas o métodos usuales en estudios geomorfológicos para la obtención de nuevos datos. Como resultado se publicaron estudios sobre: el transporte de sedimento en forma de carga de fondo (Lana-Renault & Regüés, 2007), los factores que explican la dinámica espacio-temporal de la respuesta hidrológica y el transporte de sedimento en suspensión (Seeger *et al.*, 2004; García-Ruiz *et al.*, 2005; Lana-Renault *et al.*, 2007), el efecto del estado hídrico del subsuelo en la generación de escorrentía y la respuesta hidrológica (Lana-Renault *et al.*, 2007), el análisis de la relación entre magnitud del caudal y concentración de sedimento en suspensión (Lana-Renault & Regüés, 2009) o la dinámica espacio temporal del nivel freático (Lana-Renault *et al.*, 2014a). El análisis conjunto de esta investigación se muestra en la Tesis Doctoral defendida brillantemente en enero de 2008 por la Dra. Lana-Renault, cuya información sirvió como referencia para publicar un libro que muestra los aspectos más destacados de la investigación (Lana-Renault, 2011). Siendo el primer estudio hidrosedimentológico realizado en una cuenca experimental en el Pirineo central.

El segundo paso significativo, tanto en el sentido cronológico como por su importancia en el posterior desarrollo de dispositivo de cuencas experimentales, tuvo lugar en 2004. A finales del año 2003 los doctores García-Ruiz, Regüés y Martí-Bono decidieron ampliar los estudios en cuencas experimentales incorporando un escenario fuertemente afectado

por la presencia de cárcavas (cuena de Araguás). En este caso, fue también fundamental la beca predoctoral conseguida por Estela Nadal Romero, cuya Tesis Doctoral fue dirigida por los doctores Martí-Bono y Regüés. El estudio presentó inicialmente una orientación exclusivamente geomorfológica, con el propósito de analizar la dinámica espacio temporal que presenta el desarrollo del regolito en las cárcavas (Nadal-Romero *et al.*, 2007). Sin embargo, en primavera de 2005 se monitorizó la cuena con un canal de aforo que permitió estudiar y analizar la respuesta hidrológica (Nadal-Romero *et al.*, 2008a, 2009a), la exportación de sedimento en suspensión (Nadal-Romero *et al.*, 2008b; Regüés *et al.*, 2009) o analizar la relación existente entre precipitación, escorrentía y sedimento en suspensión (Nadal-Romero *et al.*, 2008c). Asimismo, se estudió la variabilidad temporal de la erosión en relación con la dinámica del regolito superficial mediante ensayos de simulación de lluvia (Nadal-Romero & Regüés, 2009). La excelente defensa de la Tesis Doctoral presentada en mayo de 2008 por la Dra. Nadal-Romero y el libro derivado de ella (Nadal-Romero, 2011) presentan una visión conjunta de estos estudios realizados en las cárcavas de la Depresión Interior Altoaragonesa. Estos resultados han permitido estimar el impacto sedimentológico que tiene estas cárcavas en el embalse de Yesa (Regüés *et al.*, 2009; Nadal-Romero & Regüés, 2010), pero sin olvidar la incertidumbre que se asocia al cálculo de tasas de exportación de sedimento (Regüés & Nadal-Romero, 2013).

La investigación en la cuena de San Salvador se retomó con gran entusiasmo a partir del año 2005, con el inicio de la

Tesis Doctoral de Pili Serrano Muela, dirigida por el Dr. Regüés. En este caso, el estudio fue fundamentalmente hidrológico, pues la exportación de sedimento en este ambiente forestal es muy escasa y casi exclusivamente es sedimento disuelto (Serrano-Muela, 2012). Así, se analizó la respuesta hidrológica en relación a las características de la precipitación, (Serrano *et al.*, 2005), el efecto del estado hídrico del suelo (Serrano-Muela, *et al.*, 2008), de la interceptación arbórea y arbustiva (Serrano Muela *et al.*, 2012, 2013) o la influencia de propiedades edáficas en la hidrología de la cuena (Serrano-Muela, 2012). La Tesis Doctoral elaborada por la Dra. Serrano-Muela fue defendida de forma magnífica en diciembre de 2012, siendo el primer y único estudio hidrológico realizado en un bosque natural del Pirineo Central.

La investigación en la cuena de Araguás repoblación es todavía incipiente y se ha centrado en establecer comparaciones con la zona inferior de la cuena respecto a la resistencia de los agregados (Nadal-Romero *et al.*, 2009b) y los hidrogramas (Nadal-Romero *et al.*, 2010).

La financiación proporcionada por proyectos del Plan Nacional (CANOA, CETSUS, PROBASA e INDICA) y los fondos de la RESEL permitieron llevar a cabo todos estos estudios.

4.3. Los estudios comparativos entre cuenas

Uno de los mayores logros alcanzados en estos estudios ha sido el poder comparar las respuestas hidrosedimentológicas entre escenarios representativos de los ambientes más característicos de este

sector de los Pirineos. El primer estudio de este tipo se limitó a las cuencas de Arnás y San Salvador (García-Ruiz *et al.*, 2000) que posteriormente se realiza en mayor detalle (Lana-Renault *et al.*, 2011). La comparación entre todas las cuencas experimentales se ha realizado tanto a nivel hidrológico y sedimentológico (García-Ruiz *et al.*, 2008, 2010; Nadal-Romero *et al.*, 2012) como a nivel de procesos y propiedades hidrológicas (Regüés *et al.*, 2012) e incluso de eventos extremos (Lana-Renault *et al.*, 2014b).

4.4. Perspectiva de futuro en las cuencas experimentales

La conservación y mantenimiento de las infraestructuras asociadas a las estaciones de aforo constituye el objetivo prioritario, con tal de continuar ampliando los bancos de datos, pues disponer de series temporales extensas resultaría muy beneficioso para mejorar la calidad y fiabilidad del análisis hidro-sedimentológico. Por otro lado, en la actualidad se ha iniciado un estudio sobre el efecto de las repoblaciones forestales sobre las propiedades edáficas y sus consecuencias hidrológicas. En esta investigación se compararán los resultados de las cuencas de Araguás repoblación y San Salvador, para determinar las diferencias entre un ambiente forestal natural y uno repoblado. Esto ha sido posible gracias a: (i) la mayor calidad en los registros del caudal en el aforador de Araguás repoblación; (ii) la financiación proporcionada por la beca para investigación Félix de Azara (Diputación Provincial de Huesca); (iii) la beca Marie Curie obtenida por la Dra. Nadal-Romero y ligada al proyecto MED-AFFOREST (7th European Programme).

5. AGRADECIMIENTOS

Los estudios mencionados han sido posibles gracias a la colaboración de un gran número de personas que han participado en el desarrollo de las cuencas experimentales. Sin embargo, probablemente el doctor García-Ruiz merece un reconocimiento especial, por ser el principal artífice de la iniciativa y por coordinar con gran entusiasmo los estudios en las cuencas.

6. REFERENCIAS

- Bates, C.G. & Henry, A.J. (1928): Forest and streamflow experiments at Wagon Wheel Gap, Colorado. *Monthly Weather Review*, Suppl. 30: 1-79.
- Dubreuil, P.L. (1989): Pour un suivi à long terme de l'évolution des ressources en eau grâce à un réseau européen des bassins de référence. *Hydrologie*, 2: 111-114.
- Engler, A. (1919): Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, 12: 1-626.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J. & Regüés, D. (2002): Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(3): 527-537.
- García-Ruiz, J.M. & Gallart, F. (1997): Las cuencas experimentales como base para el estudio de la erosión y la desertificación. En: *El paisaje mediterráneo a través del espacio y el tiempo. Implicaciones en la desertificación* (V.G. Ibáñez & Machado eds.), *Geoforma Eds.*: 221-238, Logroño.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Arnáez-Vadillo, J., Beguería-Portugués, S., Lorente-Grima, A. & Seeger, M. (2000): Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo Central español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos Investigación Geográfica*, 26: 23-40.
- García-Ruiz, J.M., Arnáez, J., Beguería, S., Seeger, M., Martí-Bono, C., Regüés, D., Lana-Re-

- nault & N., White, S. (2005): Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena*, 59: 79-92.
- García-Ruiz, J.M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., Navas, A., Latron, J., Martí-Bono, C. & Arnáez, J. (2008): Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356(1-2): 245-260.
- García-Ruiz, J.M. & López-Bermúdez, F. (2009): *La erosión del suelo en España*. Editado por Sociedad Española de Geomorfología. 441 pp, Zaragoza.
- García-Ruiz, J.M., Lana-Renault, N., Beguería, S., Lasanta, T., Regüés, D., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., López-Moreno, J.I., Alvera, B., Martí-Bono & C. Alatorre, L.C. (2010): From plot to regional scales: Interactions of slope and catchment hydrological and geomorphic processes in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 120(3-4): 248-257.
- González, C., García-Ruiz, J.M., Martí, C., White, S., Errea, M.P. & Arnáez, J. (1997): Sediment sources in a small, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(3-4): 291-293
- Hewlett, J.D., Lull, H.W. & Reinhart, K.G. (1969): Factors affecting the response of small watershed to precipitation in humid areas. *Water Resources Research*, 5 (1): 306-316.
- Hewlett, J.D. (1982): *Principles of Forest Hydrology*. Univ. of Georgia Press, Athens, GA. 183 pp.
- Leclerc, L. (1992): Recherche et développement sur la gestion des eaux: la politique des bassins versants représentatifs expérimentaux. *Hydrogéologie*, 4: 133-137.
- Lana-Renault, N. & Regüés, D. (2007): Bedload transport under different flow conditions in a human-disturbed catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Catena*, 71(1): 155-163.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Martí-Bono, C., Beguería, S., Latron, J., Nadal, E., Serrano, P. & García-Ruiz, J.M. (2007). Temporal variability in the relationships between precipitation, discharge and suspended sediment concentration in a Mediterranean mountain catchment. *Nordic Hydrology*, 38(2): 139-150.
- Lana-Renault, N., Latron, J. & Regüés, D. (2007): Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 347(3-4): 497-507.
- Lana-Renault, N. (2008): *Respuesta hidrológica y sedimentológica en una cuenca de montaña media afectada por cambios de cubierta vegetal: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 314 pp., Zaragoza.
- Lana-Renault, N. & Regüés, D. (2009): Seasonal patterns of suspended sediment transport in an abandoned farmland catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9): 1291-1301.
- Lana-Renault, N. (2011): *El efecto de los cambios de cubierta vegetal en la respuesta hidrológica y sedimentológica de áreas de montaña: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, 189 pp., Zaragoza.
- Lana-Renault, N., Latron, J., Karssenber, D., Serrano-Muela, P., Regüés, D. & Bierkens, M.F.P. (2011): Differences in stream flow in relation to changes in land cover: A comparative study in two sub-Mediterranean mountain catchments. *Journal of Hydrology*, 411 (3-4): 366-378.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Serrano, P. & Latron, J. (2014a): Spatial and temporal variability of groundwater dynamics in a sub-Mediterranean mountain catchment. *Hydrological Processes*, 28 (3-4): 3288-3299.
- Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E. Serrano-Muela, M.P., Alvera, A., Sánchez-Navarrete, P. Sanjuan, Y., García-Ruiz, J.M. (2014b): Comparative analysis of the response of various land covers to an exceptional rainfall event in the central Spanish Pyrenees, October 2012. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(5): 581-592.

- Llorens, P. & Gallart, F. (1992): Analysis of the role of agricultural abandoned terraces on the hydrology and sediment dynamics in a small mountainous basin (high Llobregat, Eastern Pyrenees). *Pirineos*, 139: 27-46.
- Martínez-Castroviejo, R., García-Ruiz, J. M., Díez, J. C., & Alvera, B., (1991): Coarse sediment transport in an experimental high mountain catchment of Central Pyrenees, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band*, 83: 105-114.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C. & Serrano-Muela, P. (2006): Dinámica estacional de los procesos de meteorización en cárcavas del Pirineo Central. *Cuaternario y Geomorfología*, 20(1-2): 61-77.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C. & Serrano-Muela, P. (2007): Badlands dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(6): 888-904.
- Nadal-Romero, E., Latron, J., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Martí-Bono, C. & Regüés, D. (2008a): Temporal variability in hydrological response within a small catchment with badland areas, Central Pyrenees. *Hydrological Science Journal*, 53(3): 629-639.
- Nadal-Romero, E., Latron, J., Martí-Bono, C. & Regüés, D. (2008b): Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Araguás catchment, Central Pyrenees. *Geomorphology*, 97(3-4): 601-616.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D. & Latron, J. (2008c): Relationships among rainfall, runoff and suspended sediment in a small catchment with badlands. *Catena*, 74(2): 127-136.
- Nadal-Romero, E. (2008): *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo Central*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 433 pp., Zaragoza.
- Nadal-Romero, E. & Regüés, D. (2009): Conditioning of detachment by regolith development in a badland system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(6): 828-838.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P. & Martí-Bono, C. (2009a): Funcionamiento hidrológico de una pequeña cuenca de montaña con morfologías acarcavadas en el Pirineo Central. *Cuadernos Investigación Geográfica*, 35(1): 119-139.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Salvador-Sanchís, P. & Torri, D. (2009b): La estabilidad de los agregados del suelo en ambientes forestales y acarcavados del Pirineo Central. *Cuaternario y Geomorfología*, 23(1-2): 49-64.
- Nadal-Romero, E. & Regüés, D. (2010): Geomorphological dynamics of subhumid mountain badland areas-weathering, hydrological and suspended sediment transport processes: a case study in the Araguás catchment (Central Pyrenees) and implications for altered hydroclimatic regimes. *Progress in Physical Geography*, 34(2): 123-150.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D. & Serrano-Muela, P. (2010): Respuesta hidrológica en una pequeña cuenca experimental pirenaica con dos ambientes extremos: cárcavas y bosque de repoblación. *Pirineos*, 165: 135-155.
- Nadal-Romero, E. (2011): *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo Central*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, 377 pp., Zaragoza.
- Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Regüés, D., Alvera, B. & García-Ruiz, J.M. (2012): Sediment Balance in four catchments with different land cover in the Central Spanish Pyrenees. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 56(Suppl.3): 147-168.
- Regüés, D., Nadal-Romero, E., Latron, J. & Martí-Bono, C. (2009): Producción y transporte de sedimento en cárcavas desarrolladas en la depresión interior Altoaragonesa (Cuenca de Araguás, Pirineo Central). *Cuadernos Investigación Geográfica*, 35(2): 263-287.
- Regüés, D., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E. & Lana-Renault, N. (2012): Análisis de la

- variabilidad temporal de la infiltración en un gradiente de degradación de usos del suelo. *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2): 9-28.
- Regüés, D. & Nadal-Romero, E. (2013): Uncertainty in the evaluation of sediment yield from badland areas: Suspended sediment transport estimated in the Araguás catchment (Central Spanish Pyrenees). *Catena*, 106: 93-100.
- Seeger, M., Errea, M.P., Beguería, S., Arnáez, J., Martí, C. & García-Ruiz, J.M. (2004): Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288: 299-311.
- Serrano-Muela, P., Regüés, D., Latron, C., Martí-Bono, C., Lana-Renault, N. & Nadal-Romero, E. (2005): Respuesta hidrológica de una cuenca forestal de montaña media pirenaica: el caso de San Salvador. *Cuadernos Investigación Geográfica*, 31: 59-76.
- Serrano-Muela, P., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Martí-Bono, C. & García-Ruiz, J.M. (2008): Forests and their Hydrological Effects in Mediterranean Mountains. *Mountain Research and Development*, 28(3-4): 279-285.
- Serrano-Muela, P. (2012): *Influencia de la cubierta vegetal y las propiedades del suelo en la respuesta hidrológica: en una cuenca forestal de la montaña media pirenaica*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 317 pp., Zaragoza.
- Serrano-Muela, P., Regüés, D. & Nadal-Romero, E. (2012): Traslación y escorrentía cortical en la cuenca experimental de San Salvador, Pirineo Central español. *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2): 49-72.
- Serrano-Muela, P., Regüés-Muñoz, D. & Nadal-Romero, E. (2013): Traslación y escorrentía cortical en un bosque mixto de montaña media mediterránea en el Pirineo Central Español. En: *Interceptación de la lluvia por la vegetación en España (F. Belmonte Serrano y A. Romero Díaz eds.)*. Publ. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua: 359-382.
- White, S., García-Ruiz, J.M., Martí, C., Alvera, B. & Del Barrio, G. (1997): Sediment transport in a high mountain catchments in the Central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22 (3-4): 377-380.