

ESTUDIO MORFODINÁMICO DEL RÍO BERNESGA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA CONFLUENCIA CON EL ARROYO VALDEPOSADAS Y SU DESEMBOCADURA EN EL RÍO ESLA EN LA PROVINCIA DE LEÓN



Verdes campos, florida y ancha vega,
donde Bernesga pródigo reparte
su onda cristalina; alegres prados,
[...]

Ora siguen las ondas transparentes
del ancho río, que huye murmurando
por entre las sonoras piedrezuelas;
[...]

Después iremos a gozar, subidos
en el alto terrero, de la escena
noble y augusta que se ofrece en torno.
De allí verás el tortuoso giro
con que el Bernesga la atraviesa, y como,
su corriente por ella deslizándose,
ora se pierde en la intrincada selva,
cual de su sombra y soledad ansioso,
ora en mil arroyuelos dividido,
isletas forma, cuyo breve margen
va de rocío y flores guarneciendo.
Después reúne su caudal, y cuando,
robadas ya las aguas del Torío,
baña orgulloso los lejanos valles,
súbito llega do sediento el Esla
sus claras ondas y su nombre traga.

Jovellanos. Epístola quinta, a Batilo
(gentileza de Ignacio Rodríguez Muñoz)

ÍNDICE

1	Antecedentes.....	5
2	Objetivo y alcance del estudio.....	7
3	El caso del Bernesga en perspectiva. Otros casos de incisión en España	7
4	Información general de la cuenca	8
5	Fuentes de información.....	11
6	Eje longitudinal de referencia.....	16
7	Descripción de las salidas de campo	18
8	Descripción del material del lecho	41
9	Estudio de caudales	43
9.1	Estudio del caudal dominante.....	43
10	Descripción de las obras y otras actuaciones llevadas a cabo	49
10.1	Resumen de las canalizaciones en la Ciudad de León	74
10.2	Otras actuaciones.....	79
10.3	División del perfil longitudinal en tramos.....	80
10.4	Extracciones de material aluvial	82
11	Caracterización de los depósitos aluviales a lo largo del tiempo.....	91
11.1	Metodología.....	91
11.2	Resultados.....	94
12	Análisis de cambios de usos del suelo en la cuenca del bernesga	99
13	Evolución temporal de la anchura del Bernesga.....	102
14	Análisis del perfil longitudinal	107
14.1	Elaboración de los datos de partida.....	107

14.2	Perfil longitudinal prístino.....	118
14.3	Consideraciones generales sobre las causas de incisión	120
14.4	Descripción de la incisión en el Bernesga	127
15	Análisis del transporte de sedimento y de la velocidad de erosión del zócalo arcilloso	156
15.1	Estudio de la capacidad de transporte sólido en León	156
15.2	Análisis de la capacidad de transporte en tramos alejados de León.....	163
15.3	Retroceso del salto vertical del antiguo vado destruido en 2015	165
16	Pronóstico de la erosión y medidas correctoras	170
16.1	Análisis del perfil longitudinal prístino.....	170
16.2	Pronóstico de la evolución de la pendiente en los tramos canalizados	175
16.3	Pronóstico de la evolución de la pendiente en los tramos no canalizados	179
16.4	Resumen del pronóstico del perfil longitudinal.....	180
16.5	Medidas correctoras de la incisión	183
17	Conclusiones.....	197
18	Investigación futura.....	201
19	Equipo de trabajo	204
20	Referencias	205

1 ANTECEDENTES

En febrero de 2018, la empresa Tragsatec (Grupo TRAGSA) publica un Pliego de cláusulas administrativas, técnicas y económicas para la contratación del servicio para la realización del “Estudio Morfodinámico del Río Bernesga en el tramo comprendido entre la confluencia con el arroyo de Valdeposadas y su desembocadura en el río Esla en la provincia de León”. El trabajo es adjudicado a la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) con fecha 9 de marzo de 2018, y es el 21 de junio del mismo año cuando se suscribe el contrato para la realización del estudio.

La realización de este estudio de la incisión ocurrida en el río Bernesga durante las últimas décadas fue promovido por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), y surgió de la inquietud de sus técnicos por los efectos ambientales, y para las estructuras cimentadas en el cauce, de dicha incisión. La propuesta presentada por la UPC, en su oferta, hacía referencia al descenso muy acusado del fondo del cauce, que ha hecho que el espesor aluvial de algunas zonas se haya agotado totalmente, apareciendo por ello la roca del zócalo. La propuesta también menciona la historia de actuaciones realizadas en el cauce, que son las causantes de la incisión del río. Se alude a los encauzamientos (aunque más bien habría que llamarlos canalizaciones), a las extracciones de material aluvial para su uso como árido para la construcción, y a la modificación de las alineaciones del río (corte de meandros). También se indica el posible cambio de usos del suelo en la cuenca del río Bernesga (abandono de cultivos y su progresiva sustitución por bosque) como una causa de incisión, ya que podría haber reducido la aportación de material sólido al tramo bajo del río. El tramo que habría que estudiar ya había sido identificado por la CHD: los últimos 30 km de río antes de la confluencia con el río Esla. Este tramo incluye, pues, la Ciudad de León, situada a unos 15 km aguas arriba de su desembocadura.

Con fecha 20 de diciembre de 2018 se acuerda, por diversos motivos, ampliar el plazo de entrega del trabajo hasta el 28 de febrero de 2019.

El día 27 de junio de 2019 se realiza una presentación del trabajo a personal de diferentes Confederaciones Hidrográficas, dentro del marco de la *Jornada sobre incisión fluvial acelerada: El caso del Bajo Bernesga*, celebrada en León y promovida por la CHD. La jornada incluyó

también la realización de una visita a diversos puntos del río Bernesga representativos de la ocurrencia del proceso de incisión.

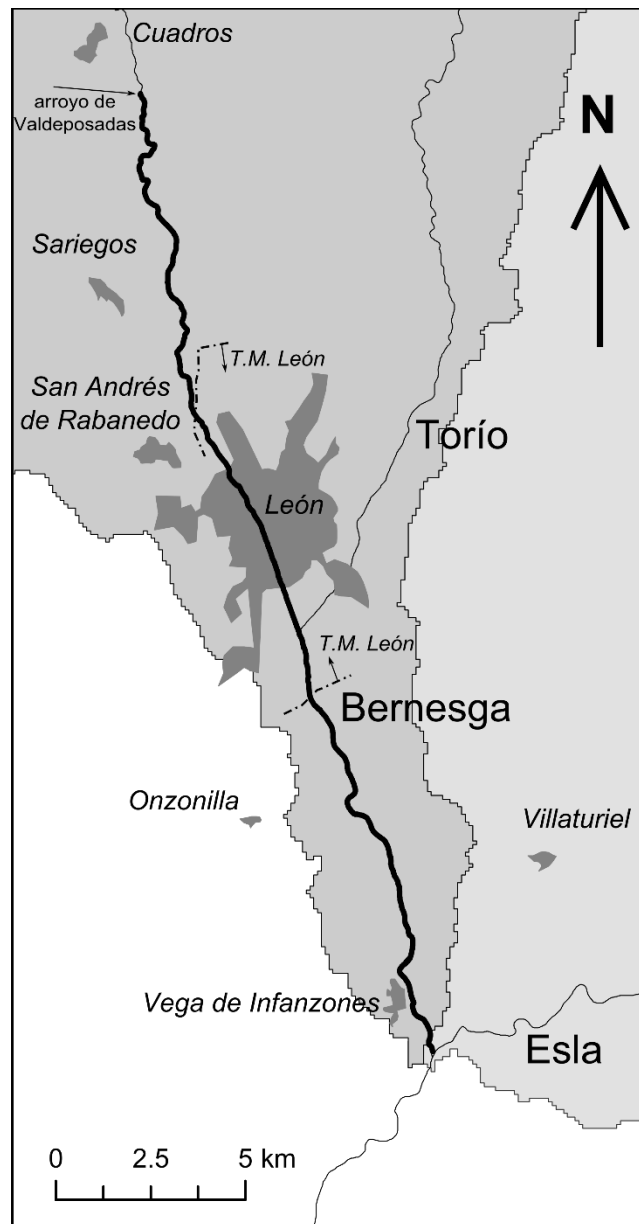


Figura 1. Tramo de estudio del Bernesga (en negrita)

2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El objetivo principal del estudio es “identificar las causas que originan los problemas geomorfológicos de incisión que presenta actualmente el cauce, generada hace décadas y agudizada en los últimos años, analizando además la importancia relativa de dichas causas”.

El alcance del trabajo son los últimos 30 km del río Bernesga, entre el arroyo de Valdeposadas en el T.M. de Cuadros y la desembocadura en el río Esla (Figura 1).

El estudio incluye una primera fase de diagnóstico en la que se identifican los factores que han provocado la incisión sufrida por el río así como su importancia relativa, es decir, qué causa es responsable de qué parte de la incisión observada. Con el diagnóstico de las causas de la incisión, el trabajo pretende hacer un pronóstico de cuál será la evolución del río, así como de las posibles medidas correctoras para así frenar el avance de la erosión del lecho (segunda fase).

3 EL CASO DEL BERNESGA EN PERSPECTIVA. OTROS CASOS DE INCISIÓN EN ESPAÑA

Las observaciones de los técnicos de la CHD ya dejan constancia de la magnitud de la incisión del tramo bajo del río Bernesga. Ante esta situación, surgen las preguntas: ¿hay más ríos peninsulares con incisión? y ¿la incisión del Bernesga es comparable con la de otros ríos?

La incisión geomorfológica en cauces fluviales ha sido estudiada casi únicamente en la parte oriental peninsular, en cursos pirenaicos, catalanes y levantinos: bajos Arga y Aragón (Núñez y Martín Vide, 2015), altos Aragón y Gállego (Beguiría et al., 2006), bajo Gállego (UPC, 2005; Martín Vide et al., 2010), Ésera (Lobera et al., 2012), Ribera Salada (Batalla, 2003), Fluvià (Mas-Pla et al., 1999), Tordera (Martín Vide et al., 2005), bajo Ebro (Vericat y Batalla, 2004; Batalla et al., 2014), Cervera (Segura y Sanchis, 2013), Palancia (Sanchis et al., 2017), Serpis (Segura y Sanchis, 2018) o Rogativa (Boix-Fayos et al., 2007). Segura (2017) recoge varios ejemplos en un trabajo de síntesis. La tesis doctoral de Ferrer-Boix (2010) profundizó en los casos de los ríos Tordera y Gállego. Fuera de la mitad oriental peninsular, Uribe Larrea et al. (2003) trataron la incisión en el río Jarama en el centro peninsular y Fernández Iglesias y Fernández García (2010)

en el Narcea. En todos estos trabajos se mencionan cifras de incisión que alcanzan como casos extremos los 5 m y puntualmente los 6 m medidos en el bajo Gállego.

4 INFORMACIÓN GENERAL DE LA CUENCA

El objeto de este estudio se limita a los aproximadamente 30 km del río Bernesga antes de la confluencia con el río Esla. A unos 15 km de su desembocadura se encuentra la Ciudad de León. Antes de llegar a León, el río discurre por los términos municipales de Cuadros (donde se ubica el extremo superior del tramo de estudio), Sariegos y, lindando con León, San Andrés de Rabanedo. Aguas abajo de León, el río cruza los municipios de Villaturiel y de la Vega de Infanzones. Unos km más aguas abajo, el Bernesga recibe por la margen izquierda las aguas del Torío (Figura 1).

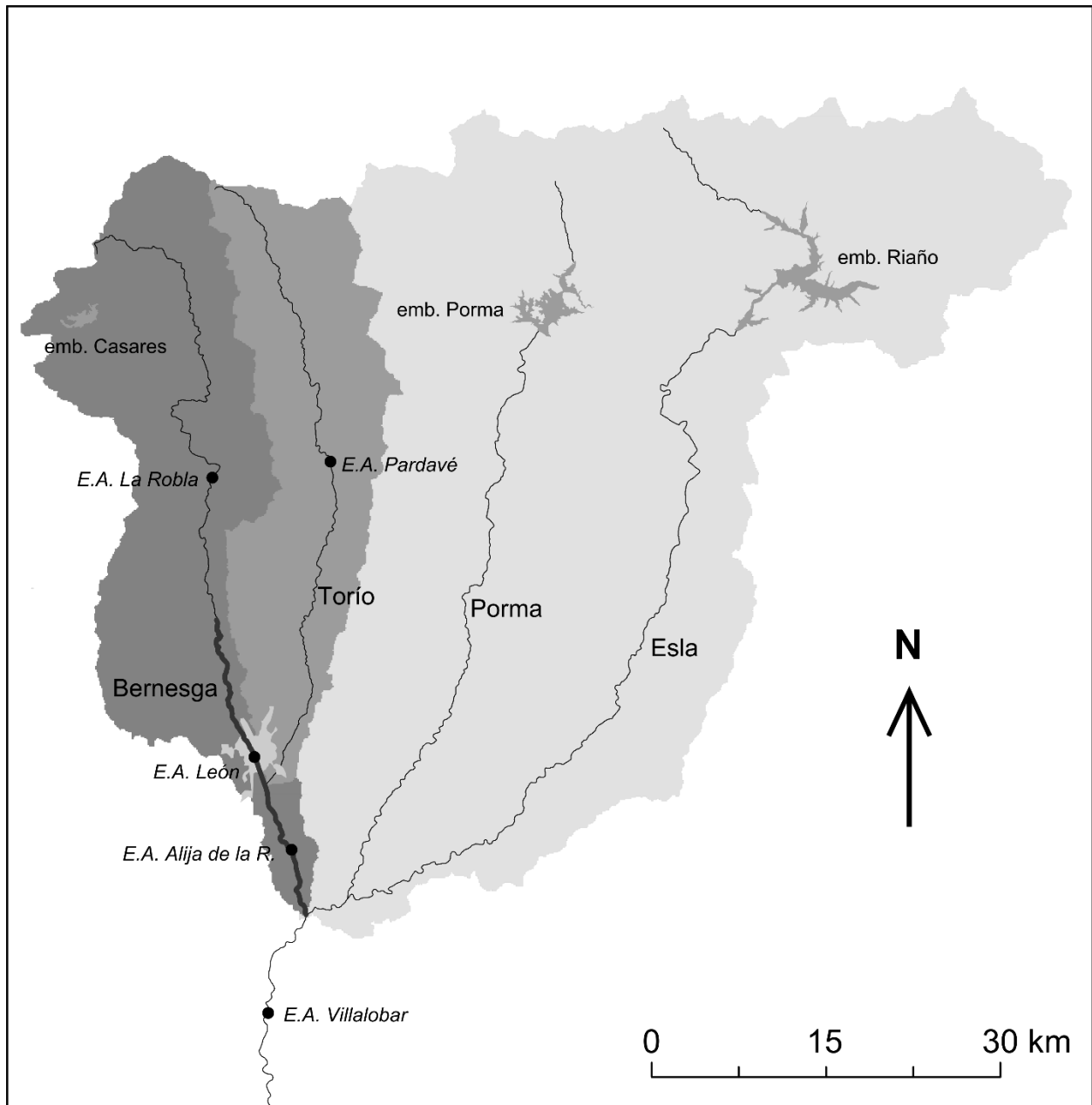


Figura 2. Cuenca del Bernesga (gris oscuro) y cuenca vertiente del Esla en la confluencia con el Bernesga. En negrita está delimitado el tramo de estudio. En la cuenca del Bernesga, está delimitada la sub-cuenca del Torío. Los círculos negros indican la posición de las estaciones de aforo (E.A.) utilizadas para el estudio.

Las cuencas del Torío y del Bernesga tienen dimensiones similares: mientras que la cuenca del Torío tiene una superficie de 485 km², la cuenca vertiente del Bernesga en el punto de la

desembocadura del Torío es de alrededor de 1,000 km², contando con éste. La superficie total de la cuenca del Bernesga es de 1,142 km². La cuenca del Bernesga tiene, desde 1984, un pequeño embalse en cabecera (embalse de Casares, en el afluente homónimo) de 7 hm³ de capacidad. La cuenca de aportación al embalse es de unos 23.5 km², es decir, que representa tan solo el 2% del área total del Bernesga, Figura 2. Por ello, la regulación de caudales en el Bernesga es escasa (el Torío no tiene regulación) y entonces su impacto sobre los cambios morfológicos sufridos por el Bernesga pensamos que es pequeño.

En la confluencia del Bernesga con el Esla, la cuenca de aportación de éste último es de 2,546 km², sin contar con el primero. A diferencia del Bernesga, la cuenca del Esla cuenta con dos embalses en cabecera: el embalse de Porma (o de Juan Benet) en el río Porma, afluente del Esla, y el embalse de Riaño, en el propio Esla (Figura 2). El primero, situado 68 km aguas arriba de la confluencia con el Bernesga (la confluencia Esla-Porma está 4.6 km aguas arriba de la del primero con el Bernesga) entró en operación en 1969 y tiene una capacidad de 318 hm³. El embalse de Riaño, en funcionamiento desde 1988, tiene un volumen de embalse de 641 hm³ y está a 87 km aguas arriba de la confluencia Esla-Bernesga. Ambos embalses regulan una cuenca de 827 km² (de la cual 574 km² es la cuenca aguas arriba del embalse de Riaño), es decir que un tercio de la cuenca de aportación del Esla en la confluencia con el Bernesga está regulada.

El grueso de la información hidrológica para el estudio se ha obtenido del registro de caudales medios diarios de las estaciones de aforo más cercanas al ámbito del estudio (ver apartado §5). Además de estos datos, se ha contado con estudios de la Confederación Hidrográfica del Duero (Santillán y Anta, 2013) y del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, (SNCZI, 2009). De estos trabajos se sabe que el caudal asociado a la máxima crecida ordinaria en el tramo urbano del Bernesga es 158 m³/s. De esta consulta, también se sabe que las mayores avenidas registradas sucedieron durante la primera década del s. XX. Estas avenidas fueron las que motivaron las primeras canalizaciones del Bernesga cerca del puente de San Marcos, ver §10. No hay registro de caudales de estos eventos ya que la estación de aforos más antigua de la cuenca (La Robla, situada unos 12 km aguas arriba de Cuadros) inicia la serie de datos en 1913.

Un aspecto de importancia en el río Bernesga es la geología de la cuenca. La Figura 3 es un detalle del corte O.NO – E.SE de la región de León. Puede verse la roca terciaria (del Mioceno) dominante en toda la región de León, que es la que encontraremos en las visitas de campo (ver foto de la portada).

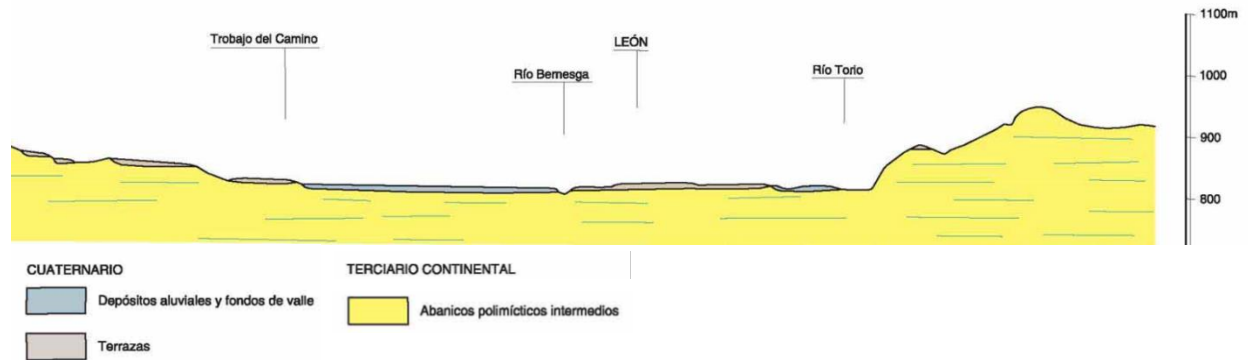


Figura 3. Tomada de: Instituto Geológico y Minero de España IGME. Mapa Geológico de España, Escala 1: 50.000. León, 161, 13-9.

5 FUENTES DE INFORMACIÓN

La información necesaria para el estudio ha sido obtenida de diversas fuentes. Gran parte de esta información ha sido facilitada gracias a la mediación de la empresa Tragsatec, que ha realizado las gestiones necesarias para conseguirla. En este grupo de datos se encuentran:

1. Modelo Hidráulico Hec-Ras del tramo de estudio realizado por la empresa Tragsatec en mayo de 2018. El modelo hidráulico incluye la información batimétrica de 2017 (ver punto siguiente), clave para analizar la evolución reciente del río y para poner en contexto algunos datos cartográficos procedentes de otras fuentes.
2. Datos topo-batimétricos del río Bernesga en el tramo de estudio. Esta batimetría fue obtenida en noviembre de 2017. Esta información consiste en 12,385 puntos con sus coordenadas en el sistema ETRS1989 Huso 30N. Esta información es la base cartográfica para la elaboración del modelo hidráulico (ver punto anterior). Además de los archivos ejecutables del modelo hidráulico, se nos envía el modelo digital del terreno (MDT) necesario para su elaboración, así como los archivos del sistema de información

geográfica (SIG) resultantes. Los datos batimétricos fueron completados por Tragsatec con información topográfica procedente del Instituto Geográfico Nacional.

3. Datos granulométricos de 25 muestras del material del lecho del cauce del río Bernesga. Las muestras fueron tomadas y analizadas en noviembre de 2017.
4. Información de diversa índole procedente de estudios, proyectos y trabajos previos, toda ella contenida en los archivos de la Confederación Hidrográfica del Duero, tanto en Valladolid como en León. En el apartado §11 se detalla el tipo de información, las fechas a que corresponde y su alcance.
5. Topo-batimetrías anteriores y posteriores a la demolición de una serie de traviesas y azudes a lo largo del Bernesga. Ver §11 para más detalles.
6. Secciones transversales de los ríos Bernesga y Esla, obtenidas en 1995, correspondientes al Proyecto Linde.
7. Fotografía aérea del año 1956 (*vuelo americano*) orto-rectificada de todo el tramo de estudio.
8. Estudios e informes procedentes del Archivo del Ayuntamiento de León.

Además de la relación anterior, se han obtenido las siguientes orto-fotografías del Instituto Geográfico Nacional:

1. Vuelo interministerial: años 1977 (tramo entre Sariegos y Vega de Infanzones), 1980 (Vega de Infanzones) y 1983 (Cuadros).
2. Vuelo SIGPAC (2002)
3. Ortofotos del PNOA de los años: 2008 y 2017

Por último, para el estudio hidrológico, ver §1, se ha contado con los caudales medios diarios registrados en las estaciones de aforo de la Figura 2 (Tabla 1). Estos datos proceden, en primer lugar de los anuarios oficiales de la web del Ministerio para la Transición Ecológica (<https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/>), consultada en marzo de 2019). Por otro contamos con los registros de aforos no oficiales (pendientes de validar) de las estaciones del Bernesga en León y Alija de la Ribera, obtenidos mediante petición a la C.H.D. Estos últimos datos corresponden a los caudales medios horarios posteriores a 2013. La Tabla 1 enumera las

estaciones de aforo usadas, la longitud de las registradas y el área de la cuenca vertiente en cada caso.

No se ha podido localizar el estudio sobre las recomendaciones para la restauración fluvial del Bernesga aguas arriba de León realizado por los profesores Marta González del Tánago y Diego García de Jalón, de la Escuela de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tabla 1. Resumen de los datos del caudal medio diario recopilados para el estudio. Los datos consultados de las estaciones de León entre 2013 y 2017 y los de Alija de la Ribera son caudales medios horarios.

Estación	Nombre	Río	Área cuenca (km ²)	Año inicio	Año final
EA-2070	La Robla	Bernesga	340	1913	2013
EA-2115	León	Bernesga	538	2003	2017
EA-2119	Alija de la Ribera	Bernesga	1,136	2015	2017
EA-2710	Villalobar	Esla	3,915	1998	2015
EA-2150	Pardavé	Torío	225	2000	2015

Tabla 2. Identificación y localización de los puentes del tramo de estudio. (*): Indica la primera fotografía aérea en que aparece. (†): sifonado en 2014, demolido en 2015.

Número	Identificación	Municipio	Año foto. aérea (*)	Coord. long. (m)
1	Puente de Carbajal de la Legua	Sariegos	1956	23,768
2	LE-5504	Sariegos	2004	23,743
3	Puente C. Coto Redondo	Sariegos	2008	21,040
4	Pasarela 1	León	2011	18,209
5	Puente C. Luis Pastrana	León	2002	17,614
6	Pasarela 2	León	2004	17,324
7	Pasarela 3	León	2002	17,105
8	Pasarela 4	León	2004	16,800
9	Puente C. Riosol	León	2002	16,578
10	Puente de San Marcos	León	1956	16,288
11	Pasarela 5	León	2002	16,057
12	Pasarela 6	León	1977	15,942
13	Puente de Los Leones	León	1956	15,622
14	Pasarela 7	León	2002	15,367
15	Pasarela 8	León	2002	14,990
16	Pasarela 9	León	1977	14,846
17	N-630	León	1956	14,439
18	Pasarela 10	León	2011	14,284
19	Puente C. los Aluches	León	2006	13,753
20	Puente LE-30	León	2002	12,709
21 (†)	Vado	Villaturiel	2002	10,549
22	Puente de Alija de la Ribera	Villaturiel	1977	6,171

Tabla 3. Identificación y localización de los azudes y traviesas en el tramo de estudio. (*): Indica el año de la primera fotografía aérea en que aparece. Notas: las traviesas dejan de ser visibles en foto aérea: (a) en 2010, (b) en 2017, (e) en 2002, (g) en 2010, (h) en 2011 (aunque permanece la base). Las traviesas (f) y (i) fueron eliminadas en verano de 2017 y en otoño de 2018, respectivamente. El azud de San Marcos (c) fue parcialmente demolido en 2013. El azud de la central hidroeléctrica (d) fue recrecido en 2006. El desagüe de la EDAR de León se sitúa inmediatamente aguas abajo de la traviesa 34.

Número travesía/azud	Identificación	Municipio	Año foto. aérea (*)	Coord. long. (m)
1	obra de toma	Cuadros	1983	28,287
2 (a)	travesía	Sariegos	2006	23,122
3	azud desmontable	Sariegos	2002	21,657
4 (b)	azud extremo superior área San Marcos	León	1973	16,499
5 (c)	azud de San Marcos	León	1973	16,265
6 (d)	azud central hidroeléctrica	León	2002	15,541
7	travesía canalización	León	2002	15,308
8	travesía canalización	León	2002	15,157
9	travesía canalización	León	2002	14,954
10 (e)	travesía canalización	León	1977	14,832
11	travesía canalización	León	1977	14,753
12 (f)	travesía canalización	León	2002	14,343
13 (f)	travesía canalización	León	2002	14,210
14	travesía canalización	León	2002	14,083
15	travesía canalización	León	2002	13,956
16	travesía canalización	León	2002	13,829
17	travesía canalización	León	2002	13,713
18	travesía canalización	León	2002	13,581
19	travesía canalización	León	2002	13,457
20	travesía canalización	León	2002	13,333
21	travesía canalización	León	2002	13,210
22	travesía canalización	León	2002	13,085
23	travesía canalización	León	2002	12,962
24	travesía canalización	León	2002	12,595
25 (g)	travesía canalización	León	2002	12,448
26 (h)	travesía canalización	León	2002	12,297
27	travesía canalización	León	2002	12,140
28 (i)	travesía canalización	León	2002	11,988
29 (i)	travesía canalización	León	2002	11,835
30 (f)	travesía canalización	León	2002	11,668
31	travesía canalización	León	2002	11,500
32	travesía canalización	León	2002	11,331
33	travesía canalización	León	2002	11,165
34	travesía canalización	León	2002	11,005
35	travesía canalización	León	2002	10,845
36	travesía canalización	Villaturiel	2002	10,681

Por último, se han obtenido topografías históricas de los municipios de: Villaturiel (1912), Vega de Infanzones (1918), Villaturiel (1919), Onzonilla (1919), Sariegos (1924), León (1925), San Andrés de Rabanedo (1925) y Cuadros (1925-1926). Estas topografías incluyen curvas de nivel cada 10 m.

6 EJE LONGITUDINAL DE REFERENCIA

Se ha delineado el eje del río Bernesga con la ortofoto del PNOA correspondiente al año 2017 (la más reciente). Este eje se ha trazado aproximadamente por el centro de la zona cubierta por agua en esa fotografía aérea. Se ha calculado la coordenada longitudinal s , a lo largo del eje, situándose su origen ($s = 0$ m) en la confluencia de los ríos Bernesga y Esla, es decir, en el extremo inferior del tramo de estudio. Este eje en planta del río Bernesga se ha usado como referencia para situar: 1) los puentes, azudes y traviesas, 2) los puntos de muestreo granulométrico y 3) las fotografías hechas durante las visitas de campo.

El tramo de estudio contiene 22 puentes (Tabla 2) y 36 azudes o traviesas. Estos últimos se ubican en su mayoría en el T.M. de León. Algunas de estas estructuras transversales han sido recientemente demolidas total o parcialmente (2017-2018). Los puentes de Carbajal de la Legua, de San Marcos y de los Leones ya estaban en pie en 1956 (fecha del vuelo americano), y el de la carretera N-630 en León estaba por entonces en obras. El puente de Alija de la Ribera, cuyo proyecto fue redactado en 1963 aparece por primera en foto aérea en 1977 (vuelo Interministerial). En 1997, la cimentación de este último puente se hormigona con una solera continua de lado a lado del cauce de tal modo que a partir de este momento, el puente de Alija actúa como si fuera una traviesa o un azud, ver §10.3.

En los aproximadamente 30 km del tramo de río hay multitud de estructuras transversales (azudes y traviesas) que alteran el perfil longitudinal del río (Tabla 3). Entre estas estructuras destaca por su magnitud el azud de la central hidroeléctrica de León, situado unos metros aguas abajo del puente de los Leones (Figura 4).



Figura 4. Azud de la central hidroeléctrica en León, 1-X-2018 (arriba). Vista aguas abajo y aguas arriba del azud en 2006 antes de ser convertido en aprovechamiento hidroeléctrico (abajo). Ver Tabla 3 para la coordenada longitudinal donde se sitúa.

7 DESCRIPCIÓN DE LAS SALIDAS DE CAMPO

Durante la realización de este estudio se han realizado tres visitas de campo, los días 24 de julio, 1 y 25 de octubre de 2018. Las dos primeras visitas fueron hechas en compañía del personal de la CHD y de Tragsatec. El profesor Alfredo Ollero (Universidad de Zaragoza) y el consultor Daniel Mora (Mastergeo) asistieron a la primera visita de octubre.



Figura 5. Localización de las fotografías y distribución en zonas.

El objetivo de las visitas de campo es observar la morfología del río en el tramo de estudio, los procesos de incisión en curso, la distribución de material aluvial (grava y arena) en el cauce y la presencia de roca en superficie del lecho. Este último material representa el sustrato del terciario que aflora debido a la erosión de los materiales aluviales del cuaternario hasta su agotamiento.

A continuación, se hace una breve descripción de aguas arriba a aguas abajo de las observaciones del Bernesga durante las tres visitas de campo. Nos basamos en las fotografías tomadas durante las visitas de campo para la descripción del tramo de estudio, las cuales se han agrupado en cuatro zonas, cada una de ellas representativa de un tramo correspondiente del río (Figura 5)



Figura 6. Vista del material aluvial (mezcla de grava y arena) y su disposición en capas que conforma la margen izquierda del río en la coordenada $s = 26.9$ km (arriba). Tramo del río con una morfología de cauce divagante (abajo) situado a 26.4 km de la desembocadura.

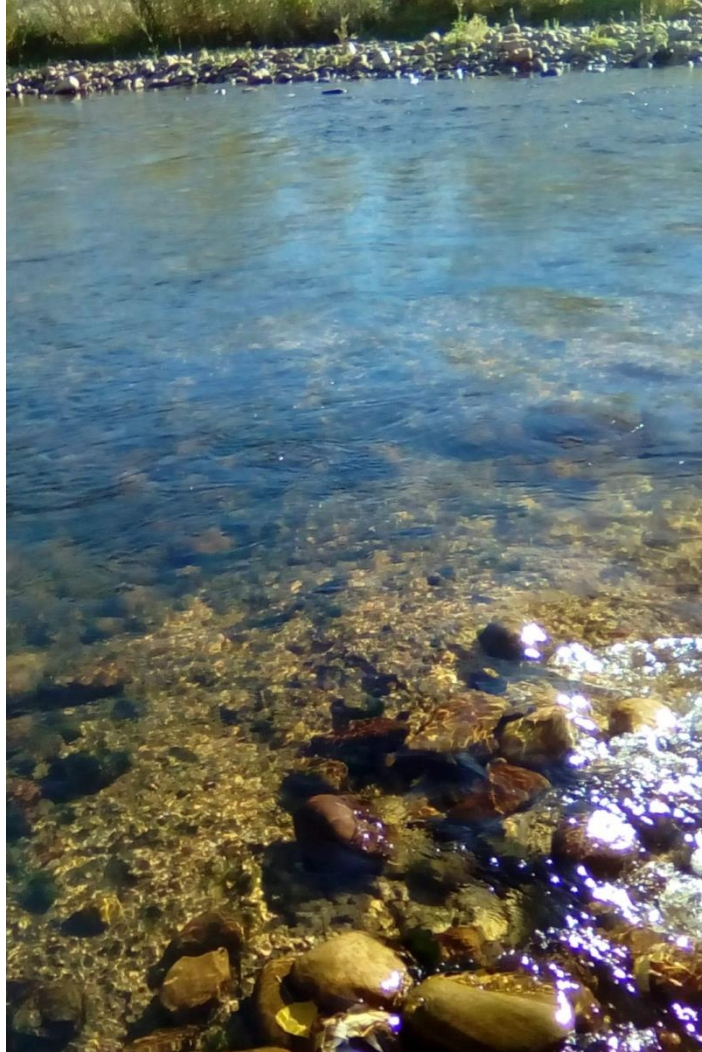


Figura 7. Imagen del sustrato rocoso bajo una estrecha capa de material aluvial. La fotografía corresponde a un punto del río situado a 25.6 km de la desembocadura y fue tomada el primero de octubre de 2018.

En la zona 1, situada entre las coordenadas $s = 26.9$ km y $s = 25.6$ km en el T. M. de Cuadros (Figura 5), es donde el río todavía mantiene una parte del dinamismo que tuvo antes de las grandes actuaciones llevadas a cabo durante la segunda mitad del siglo XX. En esta zona se observa un cauce ancho, con morfología divagante y con abundante material aluvial en superficie formando barras (Figura 6). El resto del río, aguas abajo de la zona 1, presenta una morfología de cauce único, fuertemente encajado, en muchos tramos encajado en el sustrato rocoso del terciario. También se aprecia que las planicies y las márgenes del cauce en esta zona

1 contienen material aluvial (se supone depositado por el propio río durante el cuaternario). Estas áreas eran parte del propio cauce en 1956 y 1977 (ver §11). El sustrato rocoso aflora en zonas localizadas de la parte inferior de este tramo (Figura 7). Esta observación podría indicar un proceso de erosión *remontante* (o regresiva) que iría progresivamente agotando la capa superficial de material aluvial a medida que la incisión alcance tramos del río aguas arriba. El escaso espesor de la capa superficial en algún punto de la parte inferior de esta zona apuntaría a que dichas zonas ya han sufrido una incisión significativa. La gran anchura del cauce y su morfología de cauce divagante serían el estado final de una morfología en trance de desaparición y estarían entonces “enmascarando” un proceso de incisión en curso.

La zona 2 abarca una longitud de unos 3 km aproximadamente, estando su límite superior localizado en la coordenada $s = 23.8$ km y coincidiendo su extremo inferior con el límite entre Sariegos y León (Figura 5). En el extremo superior de esta zona se encuentran los puentes de la carretera antigua de Carbajal de la Legua, finalizado en 1935 (abandonado), y su sustituto, el nuevo puente sobre la carretera LE-5504, proyectado en 2002 y visible en foto aérea en 2004 (Figura 8) (puentes 1 y 2 en Tabla 2). La presencia del zócalo rocoso es claramente visible, por ejemplo entre las pilas del puente nuevo (Figura 8 inferior), o en el tramo aguas arriba del puente histórico de Carbajal (Figura 8 superior). En esta última fotografía se aprecia también una secuencia de escalones en roca, más visibles en la zona central del cauce. Los depósitos aluviales visibles en esta zona se limitan a las áreas laterales del cauce. En el proyecto del puente nuevo, de octubre de 2002, se detalla que “el espesor de grava aluvial (cuaternario) es de 2.5 m, bajo el cual se encuentra un sustrato de arcillas miocénicas de potencia indefinida (terciario)”. Los depósitos de grava en el centro del cauce han desaparecido (Figura 8 inferior). Quedan sin embargo capas finas de aluvial en los lados. La presencia del sustrato rocoso en el centro del cauce y de material aluvial a los lados podría indicar que la incisión no se ha detenido al encontrarse con el zócalo de roca. Según esta descripción, la incisión entre 2002 y 2018 correspondería a los 2.5 m de material aluvial, agotados en la zona central del cauce, a lo que habría que añadir la erosión del estrato rocoso visible en las visitas.



Figura 8. Vista hacia aguas arriba desde el puente de histórico de Carbajal de la Legua (arriba); del mismo puente (centro) y del puente nuevo sobre la carretera LE-5504 (abajo), visto desde el puente histórico.

Es destacable que mientras que el agua ocupa toda la anchura del cauce aguas arriba de los puentes (Figura 8 superior), aproximadamente una anchura de dos vanos del puente antiguo (32 m), queda lejos de ocupar un vano del nuevo puente, de unos 20 m, aproximadamente, (Figura 8 inferior). Esta observación podría indicar que la incisión del cauce en roca va acompañada de una reducción en su anchura.



Figura 9. Vista hacia aguas arriba del río Bernesga en un punto localizado en la coordenada $s = 22.6$ km.

El afloramiento del zócalo rocoso de roca (arcilla) va en aumento a medida que se avanza hacia aguas abajo. Esto va lógicamente acompañado de una ausencia cada vez mayor de depósitos aluviales (Figura 9). A su vez, el material de las llanuras de inundación, visible en las zonas donde hay erosión de márgenes, parece estar compuesto por tierras de aportación (Figura 10), es decir que se trata de depósitos de origen no aluvial. El mismo tipo de material se observa aguas abajo del pequeño azud desmontable situado en la coordenada longitudinal $s = 21.6$ km (azud de Sariegos, Figura 59, Figura 62). Estos rellenos de material podrían estar relacionados con las explotaciones forestales planteadas en los años 1960 y 1965.



Figura 10. Vista de la margen derecha del río Bernesga en punto situado en la coordenada $s = 21.9$ km.

Entre las coordenadas $s = 20.8$ km y $s = 20.2$ km, desaparecen por completo los pocos depósitos aluviales que aguas arriba ocupaban las áreas laterales del cauce y el río Bernesga se torna un cauce que fluye sobre un contorno rocoso (Figura 11). En esta zona el material aluvial del cuaternario se ha agotado por completo. En este punto parece más claro que en el puente nuevo de Carbajal de la Legua que la aparición del zócalo rocoso no ha detenido la incisión del lecho. Pensamos que la cota superior del sustrato rocoso del terciario era, en origen, es decir antes de que éste empezase a erosionarse, uniforme a lo largo de una sección transversal. Esta cota correspondería a la de la superficie horizontal de la margen izquierda de la Figura 11. Esta cota coincide aproximadamente con la elevación a la que se sitúa, en la margen derecha, el contacto entre una capa de material de rojizo (sustrato) y un material superficial con presencia aluvial, más blanquecino, sobre el que enraíza la vegetación. La magnitud de la incisión en roca se manifiesta en la profundidad del cauce ocupado por el agua situado en la derecha de la Figura 11.

Si el proceso de erosión de la roca del terciario es como se ha descrito en el párrafo anterior, parece más claro aquí que en el puente de Carbajal que la incisión en roca va de la mano de una concentración del flujo en un cauce más estrecho (la incisión y el estrechamiento van juntos). La cohesión del material rocoso permite la existencia de taludes verticales a ambos lados del cauce, que se ha formado ya en roca (Figura 11).



Figura 11. Vista hacia aguas abajo del río Bernesga a su paso por un tramo cuyo lecho está encajado en el material rocoso del terciario, coordenada longitudinal $s = 20.2$ km. 1-X-2018

La zona 3 de la Figura 5 corresponde principalmente al tramo urbano del río Bernesga en León (situado entre las coordenadas longitudinales $s = 16.5$ km y 10.6 km). Los límites superior e inferior de dicho tramo se ubican respectivamente justo aguas arriba del puente de San Marcos ($s = 16.3$ km) y en el extremo inferior de la canalización de León ($s = 10.5$ km). Corresponde íntegramente al tramo de río canalizado. Además de multitud de puentes (ver Tabla 2), en él hay 33 estructuras, entre elementos transversales de control del perfil, llamados traviesas, y azudes.

En el tramo superior, alrededor del puente San Marcos, la presencia de material aluvial en el lecho es abundante (Figura 12). Este depósito podría tener su causa en la construcción del azud de San Marcos en 1964 (fecha del proyecto), situado unos metros aguas abajo del puente homónimo. El azud fue parcialmente demolido entre julio y octubre de 2013 (Santillán y Anta, 2013), con el objetivo de suprimir en lo posible un obstáculo en la continuidad longitudinal del Bernesga, quedando únicamente en pie su base para así mantener la protección de la cimentación del puente de San Marcos. El material aluvial hoy visible podría explicarse como lo

acumulado durante los 50 años en los que azud estuvo en pie o bien, más probablemente, como el resultado del control que ejerce el azud sobre la incisión aguas arriba desde su misma construcción.



Figura 12. Vistas desde la margen izquierda de los depósitos de material aluvial aguas arriba (foto superior) y aguas abajo del puente de San Marcos (foto inferior). La imagen superior pertenece a un punto situado unos 220 m aguas arriba del puente.

Según el proyecto de construcción del azud, su altura sobre cimientos fue de 6.5 m. Esta altura difiere con respecto a los planos del proyecto de demolición, que la cifran en 6 m. La cota de coronación del azud estaba a 823.54 m.s.n.m. Para los cálculos siguientes, tomamos por buena la primera cifra de la altura del azud. Según los datos del proyecto de construcción, el sustrato arcilloso estaba a una profundidad de 4.75 m respecto de la cota de coronación del azud, es decir a cota 818.79 m.s.n.m. Según la topo-batimetría de 2017, el tálveg del cauce en este punto está en 820.99 m.s.n.m. (estaba en 820.41 m.s.n.m. en 2013, fecha del proyecto de

demolición). Estos datos significan que el espesor actual del depósito aluvial en este punto es de 2.2 m, unos 0.6 m más que en 2013.

En el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones, pueden verse algunos depósitos de grava emergidos (Figura 13). Su presencia podría ser consecuencia de la movilización de material aluvial al ser rebajado el azud de San Marcos en 2014.



Figura 13. Izquierda: depósito de material aluvial en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones. La fotografía fue tomada desde la pasarela 6 (Tabla 2) mirando hacia aguas arriba. Al fondo se ve un arco del puente de San Marcos. Foto: 24 de julio de 2018. Derecha: Desde la misma pasarela, pero situados un poco más a la derecha (izquierda del río), el aspecto era muy distinto el 11-VI-2004. Probablemente, el cauce se ha llenado de gravas que el rebaje del azud de San Marcos ha puesto en movimiento.

El tramo de río entre el azud de la central hidroeléctrica (Figura 4) y el final de la canalización está repleto de traviesas para el control del perfil longitudinal ejecutadas al tiempo que se avanzaba en las distintas fases de la canalización, entre 1968 y 1983 (el apartado §10 proporciona información completa sobre el ritmo de avance y de las características de las distintas fases de la canalización). La Figura 14 es una imagen de una de las traviesas del tramo aguas abajo del puente de los Leones. Este tramo se caracteriza por la casi total ausencia de material aluvial en superficie (Figura 15). Sin embargo durante la visita del día 25 de octubre y coincidiendo con las obras de demolición de las traviesas 28 y 29 (Figura 16 y Figura 17), se

observó abundante material de origen aluvial, visible por el movimiento de tierras previo a su demolición. Al derribo de estas traviesas hay que sumar la demolición en verano de 2017 de las traviesas 12, 13 y 30. Las cinco traviesas anteriores ya habían colapsado antes de su derribo. Estas actuaciones se han llevado a cabo para que evitar que la incisión remontante agravara el estado, precario, de las traviesas aguas arriba (J.I. Santillán, comunicación personal).

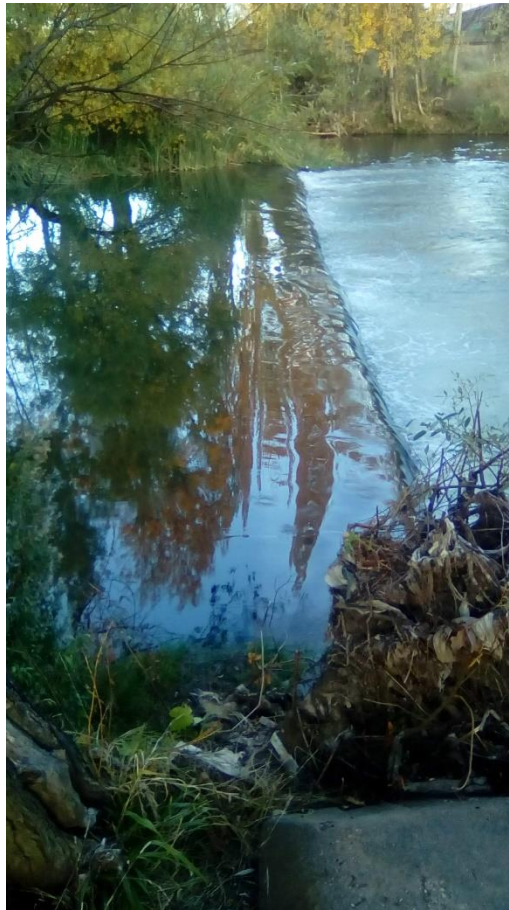


Figura 14. Vista desde la margen izquierda de la traviesa 14 (Tabla 3), situada en la coordenada $s = 14.1$ km, a unos 200 m aguas abajo de la pasarela 10 (Tabla 2)



Figura 15. Vista del zócalo arcilloso del fondo del cauce desde la pasarela 10 (Tabla 2).



Figura 16. Vista hacia aguas arriba de la traviesa 28, que se acabó demoliendo durante el otoño de 2018, después de la foto. El material aluvial es visible por las obras demolición de la traviesa 29, situada unos 160 m aguas abajo de la que se observa en la fotografía (Figura 17). Esta imagen pertenece a un punto situado en la coordenada longitudinal $s = 12.0$ km.



Figura 17. Obras de demolición de la traviesa 29, situada en la coordenada longitudinal $s = 11.8$ km.

El final del tramo de la zona 3 coincide con el final de la canalización del río Bernesga y justo con la posición que ocupaba un vado visible por primera vez en foto aérea en 2002 (posterior a 1997) y formado por cajones de hormigón. Según consta en fotografías proporcionadas por J.I. Santillán (CHD), la base de los cajones del vado fue cimentada sobre la roca arcillosa del terciario (Figura 19). Parece pues que entonces el grosor aluvial en este punto ya se había agotado. El vado dejó de ejercer un control para el perfil longitudinal aguas arriba durante el otoño-invierno de 2014 y fue derribado en verano de 2015 (comunicación personal de J.I. Santillán, Figura 19). En una imagen aérea de abril de 2015, se aprecia el colapso parcial del puente, anterior al derribo (Figura 18). El vado no se ha reconstruido. En este punto no hay en la actualidad material aluvial en superficie. Es destacable que, al igual que aguas arriba de la León (Figura 11), la roca no ha detenido la incisión: la imagen de la derecha tomada en abril de 2014 demuestra cómo la incisión ha continuado en la roca arcillosa dejando colgado al estrato aluvial superior (Figura 19).



Figura 18. Fotografía aérea del colapso parcial del vado. Fecha de la imagen: 20 de abril de 2015. Imagen tomada de Google Earth.



Figura 19. Secuencia de imágenes del vado situado aguas abajo de la canalización del Bernesga. Fotografías gentileza de J.I. Santillán y I. Rodríguez (CHD).

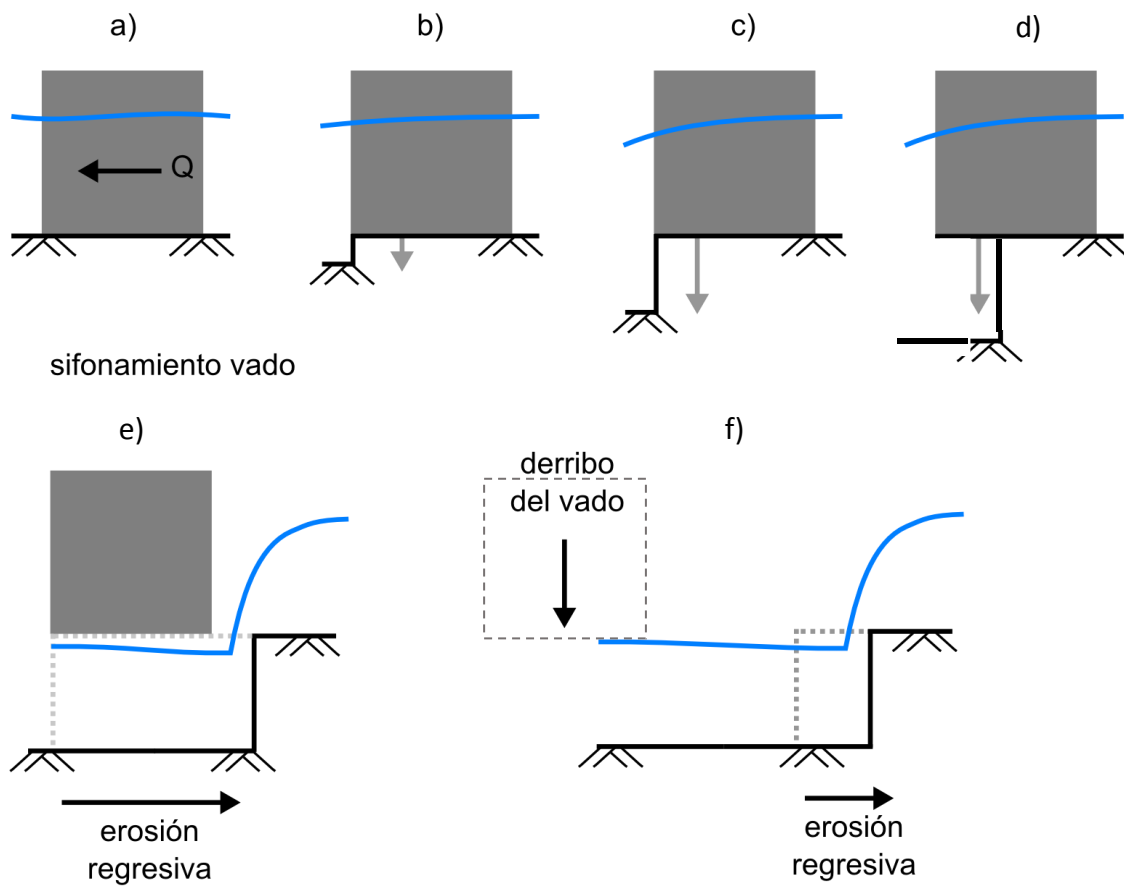


Figura 20. Esquema del funcionamiento del vado (cajón gris oscuro en las viñetas a), b), c), d, y e) en el control del perfil longitudinal antes y después de su colapso por sifonamiento, que ocurre en la viñeta e). Las flechas verticales en gris indican el aumento del salto de cota del cauce entre aguas arriba y aguas abajo del vado por el efecto combinado de la erosión local y la incisión o erosión general. La línea de color azul representa, de forma esquemática, la lámina de agua.

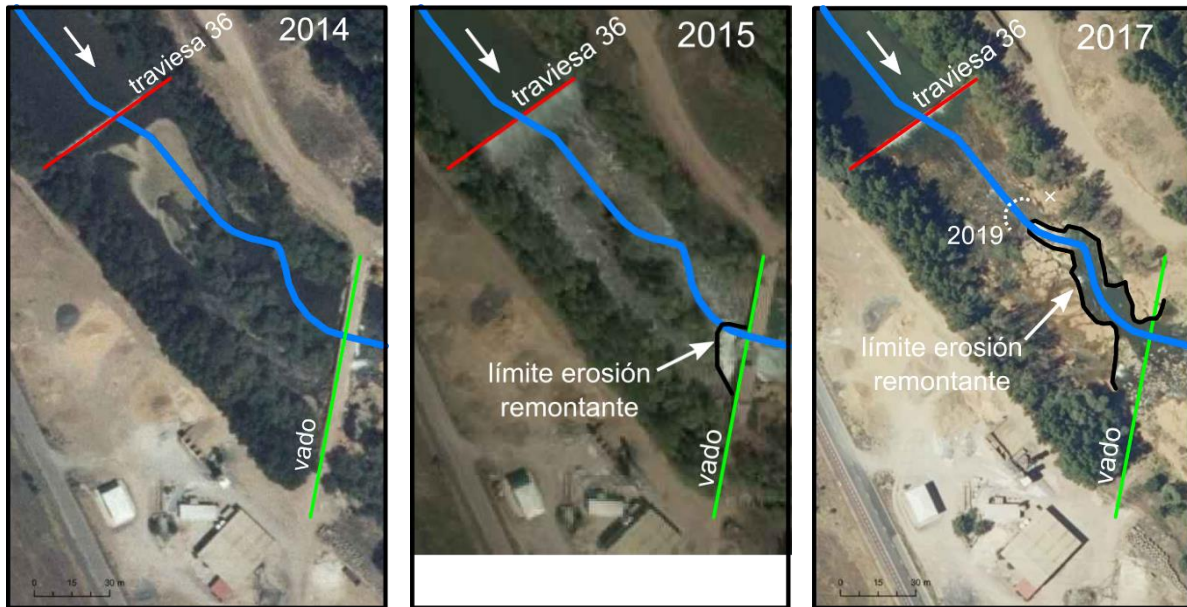


Figura 21. Secuencia de imágenes aéreas en la que se aprecia la erosión regresiva en roca después del colapso del vado. En línea de trazos la posible posición del frente durante la visita de mayo de 2019.

La solera del vado operaba como un punto del control del perfil longitudinal aguas arriba durante el tiempo en que estuvo en servicio. Un foso de erosión local se formó a partir de ese momento al pie de la estructura. Es probable que el salto entre las cotas del lecho aguas arriba y aguas abajo de la estructura fuera aumentando con el tiempo.

La combinación de los procesos de erosión local y de incisión en el tramo aguas abajo llevaron finalmente al colapso de la estructura. A partir de ese momento, sin el impedimento que suponía la solera del vado, se produce una erosión regresiva del salto que desplaza el punto en que se produce el salto vertical hacia aguas arriba. Es la cohesión del material del fondo la que permite que el talud del salto se mantenga vertical durante su traslación hacia aguas arriba. La Figura 20 ilustra de forma simplificada el papel jugado por el vado en el control del perfil longitudinal aguas arriba y el proceso de erosión *remontante* después de su colapso. La Figura 22 muestra una vista desde la margen izquierda del salto que se originó al pie del vado y que desde su colapso ha migrado unas decenas de metros hacia aguas arriba. La erosión en cauces de material cohesivo formando una pared o salto casi vertical que migra hacia aguas arriba

(*headcut* o *knickpoint*) es un asunto que ha captado la atención de la geomorfología fluvial (p.e. Bennet, 1999 o Flores-Cervantes et al., 2006). La velocidad a la que el salto retrocede se estudia con detalle en el apartado XX.



Figura 22. Vista del salto vertical desde la margen izquierda. El vado estaba situado unas decenas de metros aguas abajo de este punto. Fotografía tomada el día 1 de octubre de 2018.

Por último, el tramo inferior (zona 4, en la Figura 5) abarca los últimos 10 km del río Bernesga antes de la desembocadura en el Esla. Se trata del tramo de río donde la incisión es mayor. Igual que en muchos de los tramos superiores, no se observan depósitos de grava en superficie. Destacan por la magnitud de la incisión observada en la roca, las secciones de un tramo relativamente rectilíneo, fuertemente encajado (incisión superior a 6 m) (Figura 23). En el fondo del cauce en este tramo se observan las formaciones rocosas no uniformes, con entrantes y salientes. No sabemos si estas irregularidades, como nos parece, obedecen a procesos de erosión diferencial en el material terciario, a causa de 1) una resistencia variable a la erosión según los sitios y del 2) flujo preferencial del agua por algunas zonas.



Figura 23. Imagen desde la margen izquierda del cauce encajado, primero en el material aluvial y más en profundidad, en el material arcilloso correspondiente al terciario (arriba). En la imagen inferior, detalle de las formaciones, macro-rugosas del sustrato rocoso anterior, producida por diferente erosión de la roca. La imagen está tomada en un punto situado en la coordenada longitudinal $s = 9.6$ km.

Inmediatamente aguas abajo de este tramo se puede observar un espigón construido con gaviones cuya cimentación, sobre el estrato de arcilla (Figura 24), ofrece una prueba del proceso de incisión en este terreno que ha sufrido y que posiblemente todavía está en curso en el tramo bajo del río Bernesga. Parece ser que el espigón formaría parte de los 15 espigones que se proyectaron en 1965 para proteger la margen derecha del río (López de Soseaga y Lapeña, 1965). Si eso es cierto, las obras terminaron en diciembre de 1969. El hecho mismo de

que esté cimentado sobre arcilla y no sobre el aluvial del cuaternario nos hace pensar que la incisión del Bernesga en este punto ya debía de ser significativa en el momento de su construcción.



Figura 24. Vista desde la margen izquierda de un espigón de gaviones colgado. La fotografía pertenece a la coordenada longitudinal $s = 9.4$ km. Fecha: 24 de julio de 2018.



Figura 25. Vista desde aguas abajo del puente de Alija de la Ribera. Imagen tomada el 24 de julio de 2018.

El punto que concentra mayor atención en este tramo es el puente de una carretera en Alija de la Ribera (T.M. de Villaturiel). El puente se construyó en 1963 (fecha del proyecto) como un puente de 5 vanos de 16 m cada uno. Las cimentaciones consistieron en 4 pilotes (hasta una profundidad de 10 m) bajo cada pila. En 1997 se reparó el puente debido a que la incisión del cauce superaba los 4 m. Se repararon una pila y el estribo de la margen izquierda. Parece que es en aquel momento cuando se ejecuta la solera de hormigón todavía hoy visible (Figura 25). Con anterioridad se llevaron a cabo trabajos de protección de la cimentación, que se recalzó con sucesivas actuaciones de escollera, soleras de hormigón y recalces de las pilas. A partir del momento en que la solera del puente se hormigona (1997), éste actúa como un elemento de control que impide la incisión aguas arriba, ver §10.3. La evolución de la cota del cauce del tramo de río entre el puente y la desembocadura en el Esla (de 6.2 km de longitud) está controlada por la cota del Esla en el punto de la desembocadura del Bernesga, por la dinámica del transporte sólido (suministro versus capacidad) y por la *erosionabilidad* del sustrato rocoso del terciario. La incisión por un desequilibrio entre la disponibilidad y la capacidad de transporte se estudia con detalle en el apartado §14.3.

El siguiente punto de la visita de campo está situado en la coordenada longitudinal $s = 3.6$ km. En este tramo, tampoco hay rastro de material aluvial. El cauce está totalmente encajado en el sustrato rocoso del terciario (Figura 26). Existe una pequeña capa superficial de material aluvial sobre la llanura de inundación original, hoy colgada, que se confunde por su escaso espesor, con suelo resultante de procesos de degradación de la materia orgánica. Este espesor tan escaso, suficiente apenas para las especies arbóreas de silvicultura que se cultivan allí, podría ser el residuo de una llanura aluvial originalmente de poco grosor (como en la mayoría del curso del Bernesga en su valle), pero que además fue usada para extracción material aluvial como áridos para la construcción.

El material rocoso, que como en tramos superiores parece tener un alto contenido de arcilla, es fácilmente erosionable, aunque en él se encuentran finas capas intercaladas de un material conglomerado, más resistente. Del mismo modo que en el tramo de incisión en roca en la zona 2 (Figura 11), el hecho de que la zona que alcanza el agua ocupe una anchura inferior a la del

cauce incidido y que en la margen izquierda de éste exista una pequeña extensión horizontal, nos vuelve a hacer pensar en una relación entre incisión y estrechamiento del cauce.

La *erosionabilidad* del zócalo de arcilla es debida a la falta de cualquier elemento que cementase las partículas de arcilla durante la formación de la roca en el terciario. Haciendo una analogía, esta roca arcillosa sería equivalente a un conglomerado, pero sin la presencia del carbonato cálcico que es precisamente el que mantiene unidas las partículas que lo forman.



Figura 26. Arriba: tres vistas del talud, casi vertical, de la margen izquierda del río. Abajo: vista desde aguas arriba del río. Las líneas rojas y azules indican los mismos elementos en las distintas fotografías. La línea roja indica el punto más elevado del lecho incidido y la línea azul

un punto intermedio al pie del talud más vertical con presencia de un material “conglomerado”,
ligeramente cementado.

Por último, durante la visita de campo del día 25 de octubre, pudimos ver que el lecho del río Esla cerca de la unión con el Bernesga también está compuesto por el mismo material rocoso que hemos observado en tantos tramos del Bernesga (Figura 27). Esta observación, que constata la fuerte incisión que también ha sufrido el Esla, será analizada con más detalle en apartados posteriores, donde se estudiará su influencia en la incisión del Bernesga.



Figura 27. Pilas del puente de la carretera LE-5516 sobre el río Esla en Villaroañe (T.M. de Villaturiel). Obsérvense las formaciones rocosas, de naturaleza irregular, muy parecidas a las presentes en muchos tramos del río Bernesga (Figura 23).

8 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DEL LECHO

La empresa Incosa realizó en diciembre de 2017 los trabajos para la obtención de muestras granulométricas del lecho. Se trata de muestras volumétricas (frecuencia por peso) de la capa superficial del material aluvial. No sabemos exactamente cuánto material contenía cada muestra. La empresa Tragsatec (peticionaria del trabajo de muestreo) nos informa que cada muestra contenía unos 30 kg aproximadamente de sedimento (comunicación personal). Las

muestras se cuartejan en laboratorio donde se tamizan. El tamizado se hace sobre una muestra de unos 4 kg aproximadamente. Las partículas superiores a 100 mm no se tamizan.

Tabla 4. Estadísticos de las muestras granulométricas del Bernesga. D_g y σ_g son el tamaño medio y la desviación geométricas. D_{50} es tamaño correspondiente al percentil 50, es decir, el tamaño por debajo del cual queda el 50% de la muestra (la mediana). El % finos indica el porcentaje en peso de la muestra con tamaños de partícula menores de 0.08 mm.

ID	Coord. Long. (m)	D_g (mm)	σ_g (-)	D_{50} (mm)	% finos (-)
18	430	4.4	5.6	1.9	37.9
17	1750	11.0	6.5	19.7	2.2
16	2992	12.4	5.7	18.2	1.1
15	4011	0.8	3.5	-	60.4
14	5015	1.1	3.4	-	57.3
13	6024	2.4	3.9	-	61.4
12	7533	11.6	4.1	17.7	0.7
11	9290	0.8	2.0	-	82.9
10	10,295	0.9	1.8	-	87.3
9	11,170	9.8	5.5	23.1	5.6
8	11,827	20.4	3.0	27.7	0.2
7	12,691	12.8	3.7	21.1	0.7
6	14,335	2.7	6.3	0.1	47.4
5	15,236	2.5	12.8	0.4	8.5
4	16,411	14.3	4.7	22.9	0.8
2	17,630	17.5	4.6	31.3	1.4
1	18,850	4.9	5.2	8.8	4.9
3	19,885	11.1	5.6	21.6	1.3
20	21,057	7.6	5.0	12.8	1.5
21	22,234	13.2	4.8	23.1	0.5
22	23,763	12.4	4.6	17.3	0.7
23	24,447	10.9	5.0	16.2	2.3
24	25,670	12.5	3.7	16.6	1
25	27,297	8.3	6.7	17.7	4
26	28,233	11.6	4.1	17.3	0.4

Se han analizado los resultados del muestreo y se han encontrado los estadísticos más importantes de cada una de las muestras (parámetros de posición y dispersión, Tabla 4). No

existen variaciones significativas del tamaño medio según la coordenada longitudinal. El D_{50} promedio de todas las muestras es 17 mm (grava gruesa). Esta cifra sube hasta 19.4 mm si se excluyen las muestras con un 5% de finos. Los resultados detallados del análisis granulométrico están en el Anejo D.

9 ESTUDIO DE CAUDALES

Este apartado tiene por objetivo el análisis de los datos hidrológicos recogidos. Queremos conocer el caudal dominante del Bernesga en el tramo de estudio, así como en el Torío y el Esla. Estos resultados serán de utilidad para pronosticar la evolución del Bernesga, ver 16.2. Un segundo objetivo es el de conocer los hidrogramas registrados entre 2013 y 2017 en el tramo urbano de León y entre 2015 y 2017 en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Torío. En el primer caso se pretende estudiar cuál fue la respuesta del río (movilidad del sedimento del lecho) a la demolición parcial del azud de San Marcos en 2013. En el segundo caso se busca conocer la velocidad a la que se erosiona la roca del zócalo arcilloso después del sifonamiento y posterior demolición del vado aguas abajo del extremo inferior del encauzamiento del Bernesga (Tabla 2).

9.1 Estudio del caudal dominante

La acción del agua sobre un fondo aluvial depende del caudal que circule: cuanto mayor sea el caudal, mayor será la acción de moldeo. Como el régimen de caudales de un río es variable, conviene buscar un caudal “promedio” del hidrograma completo cuya función modeladora del cauce sea equivalente a la que en realidad realizan todos los caudales (sobre todo los que exceden un cierto umbral). A este caudal se le denomina caudal dominante o formativo y se le considera como el responsable de las formas fluviales y de las dimensiones de los cauces. Aunque existen varias metodologías para determinarlo, un modo habitual de obtenerlo es en base a criterios hidrológicos. Según estos criterios, el caudal dominante es el caudal medio diario de una crecida que, en promedio, ocurre una o dos veces al año. Es pues el primer o el segundo caudal de la curva de caudales clasificados o de frecuencia. Para obtener el caudal dominante de un río se necesitan pues los caudales medios diarios registrados en las estaciones de aforo de interés. Para este estudio, nos interesa obviamente el caudal dominante en el

Bernesga, aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío, así como los caudales dominantes del Torío y del Esla. Estos dos últimos valores nos serán útiles para analizar el pronóstico de la evolución del perfil longitudinal del Bernesga, ver §16.2.

La estación de aforos en el Bernesga con una serie de datos más completa es la de la Robla (Figura 2). Los registros de la serie, acumulan, entre 1913 y 2013, caudales medios diarios equivalentes a 81 años completos. Está situada 12 km aguas arriba de Cuadros, siendo su cuenca vertiente 340 km^2 . En el tramo de estudio existen dos estaciones de aforo: en el tramo urbano de León y en el puente de Alija de la Ribera (Figura 2). La primera de ellas, registra el caudal que genera la cuenca vertiente en este punto, 538 km^2 (Tabla 1), entró en funcionamiento en 2003. La longitud de la serie de datos de la estación de Alija de la Ribera, situada aguas abajo de la confluencia con el Torío (Figura 2) y con una cuenca de aportación de $1,136 \text{ km}^2$, es de solo 4 años, desde 2015 (Tabla 1). El alcance de las series de caudales registrados en estas dos últimas estaciones no es suficiente para estimar el caudal dominante del Bernesga en el tramo de estudio. Por eso, debemos de usar los caudales medidos en la estación de la Robla. Sin embargo, la diferencia en área de aportación entre las estaciones de la Robla y León hace que los registros de la primera deban ser corregidos para poder ser representativos del Bernesga en León. Para esta corrección se han elegido los caudales medios diarios de las estaciones de La Robla y de León del periodo enero-2003 hasta septiembre-2013. Estos caudales se han representado en la Figura 28. Como era esperable, el caudal medio diario en León es sensiblemente mayor que el registrado en La Robla (los datos quedan ligeramente por debajo de la diagonal, que denota la igualdad entre ambos caudales). La recta de regresión de los datos simultáneos de ambas estaciones que pasa por el origen de coordenadas (línea de trazos de la Figura 28) indica que el caudal medio diario en León es un 11% mayor que el registrado en La Robla. Este aumento del caudal medio es menor que el incremento de superficie de aportación entra las estaciones de aforo, que crece en un 58%. Con estas relaciones, se obtiene la siguiente relación entre el caudal medio diario Q y área de aportación A :

$$Q = aA^{0.23}$$

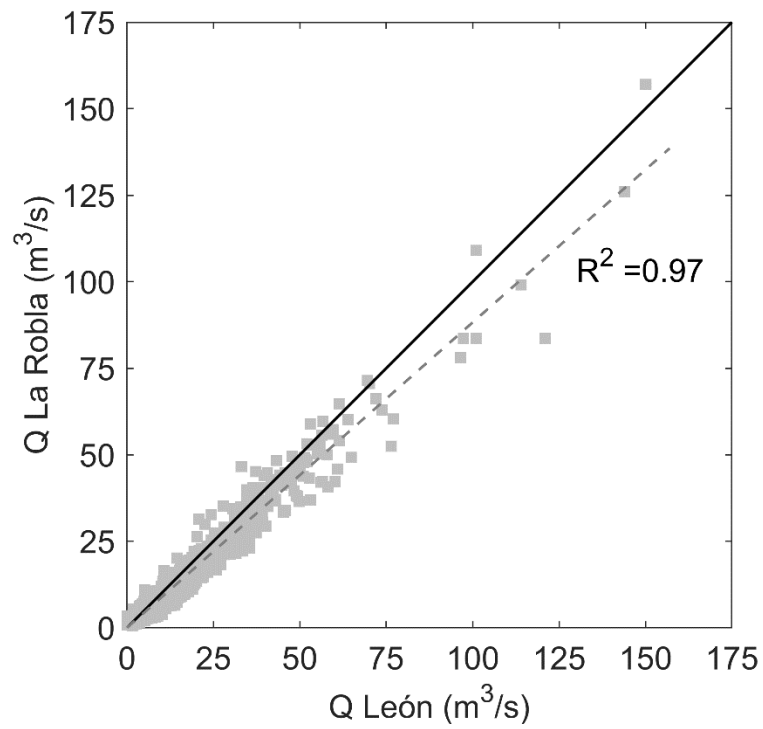


Figura 28. Relación entre el caudal medio diario registrado en las estaciones de aforo de la Robla y en la Ciudad de León. La línea continua (diagonal) denota la igualdad entre los caudales de ambas estaciones y la línea de trazos es la recta de regresión de los datos que se obtiene al forzar su cruce por el origen de coordenadas.

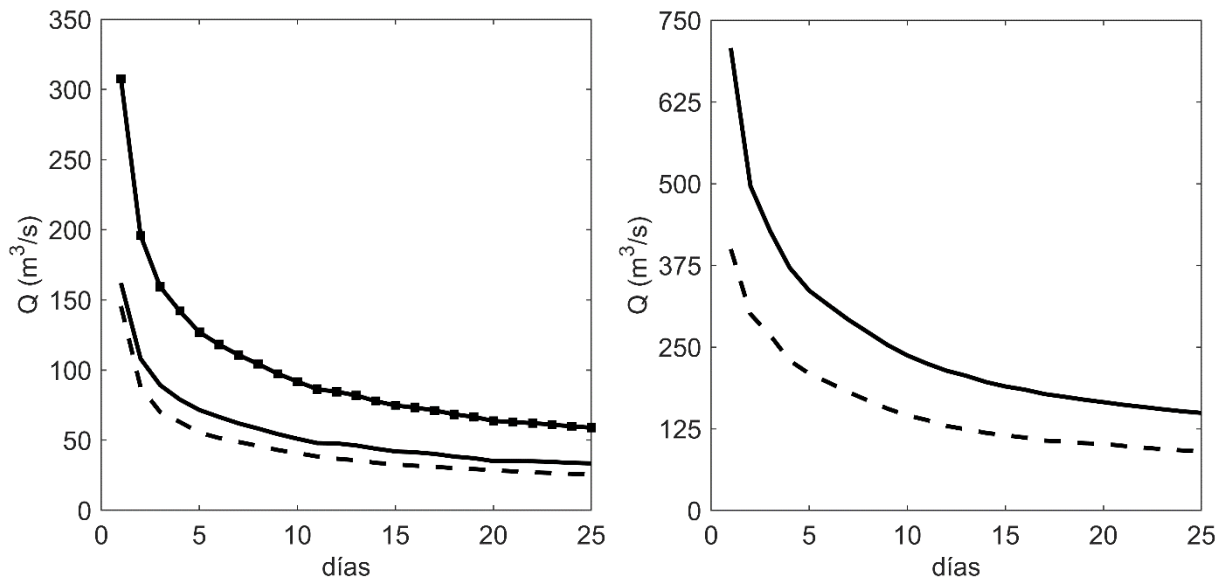


Figura 29. Izquierda: Curvas de caudales clasificados (primeros 25 días) del Bernesga aguas arriba del Torío (línea continua), del propio Torío (línea de trazos) y del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío (línea negra con cuadrados). Derecha: Primeros 25 días de la curva de caudales clasificados del Esla aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Bernesga (líneas continua y de trazos respectivamente).

La curva de caudales clasificados del Bernesga en León (aguas arriba de la confluencia con el Torío) se obtiene tras incrementar en un 11% los caudales registrados en la estación de La Robla (Figura 29). Se puede comprobar cómo esta operación es equivalente a obtener el caudal medio diario en León mediante la siguiente relación de áreas:

$$Q_{B,León} = Q_{B,La\ Robla} \left(\frac{A_{B,León}}{A_{B,La\ Robla}} \right)^{0.23}$$

Para la cuenca del río Torío solo disponemos de los caudales registrados en la estación de aforos de Pardavé (Tabla 1). Esta estación está situada a 33 km de la confluencia del Torío con el Bernesga (su área de aportación es de 225 km^2 , alcanzando 486 km^2 la superficie total de la cuenca). Estas diferencias hacen necesaria la corrección de los caudales medios registrados en dicha estación para que puedan ser representativos del Torío en su desembocadura en el

Bernesga. Como no existe ninguna estación de aforos aguas abajo de la de Pardavé para repetir la operación que se ha llevado a cabo en el Bernesga, hacemos la hipótesis que las cuencas de ambos ríos (Torío y Bernesga) tienen un comportamiento hidrológico similar. Esto nos permite calcular el caudal en la desembocadura del Torío usando la relación anterior:

$$Q_{T,León} = Q_{T,Pardavé} \left(\frac{A_{T,León}}{A_{T,Pardavé}} \right)^{0.23}$$

lo que, dadas las superficies de aportación en este caso, supone aumentar los caudales medios diarios registrados en Pardavé en un 19%. Con esta corrección podemos ya obtener la curva de caudales clasificados del Torío en la confluencia con el Bernesga (Figura 29).

La estación de aforos de Alija de la Ribera, aguas abajo de la confluencia con el Torío, solo dispone de dos años de registros (Tabla 1), lo que impide obtener una curva de caudales clasificados representativa del tramo del Bernesga aguas abajo de recibir al Torío. Es por ello que preferimos estimar la curva de frecuencias de caudal como la suma de las curvas de caudales clasificados del Bernesga y del Torío obtenidas anteriormente (Figura 29). Este procedimiento indirectamente asume que las crecidas más importantes (relevantes para el cálculo del caudal dominante, interés final de las curvas de caudales clasificados) en ambos ríos, Torío y Bernesga, se producen de forma simultánea. El resultado es pues una cota superior del caudal dominante en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Torío: se obtendría un caudal dominante menor si las crecidas en ambas cuencas no fueran simultáneas, pues los caudales mayores de uno de los dos ríos coincidirían con caudales menores en el otro, dando como resultado en un caudal dominante menor.

Para el cálculo del caudal dominante en el río Esla se usa la estación de aforos de Villalobar, situada 10.7 km aguas abajo de la confluencia del Bernesga con el Esla (Figura 2). El área de la cuenca de aportación en este punto es de 3,915 km² (Tabla 1). La superficie de la cuenca del Esla después de la incorporación del Bernesga es de 3,638 km². Los 277 km² de diferencia corresponden en gran parte a las aportaciones de dos arroyos (arroyo de la Oncina y arroyo del Reguero) por la margen derecha del Esla. Estamos interesados en conocer el caudal dominante

del Esla antes de la confluencia con el Bernesga. Para ello, seguimos la misma metodología que se ha usado anteriormente para corregir los registros de Villalobar:

$$Q_{E,confluencia} = Q_{E,Villalobar} \left(\frac{A_{E,confluencia}}{A_{E,Villalobar}} \right)^{0.23}$$

que apenas supone una reducción del 1.6% respecto a los caudales de la estación de Villalobar. La curva de caudales clasificados así obtenida incluye las aportaciones de la cuenca del Bernesga. Haciendo la misma hipótesis anterior, la curva de caudales clasificados del Esla antes de confluencia con el Bernesga se obtiene de sustraer de la curva de frecuencias de caudales del Esla aguas abajo de la confluencia, la curva de caudales clasificados del último tramo del Bernesga. Ambas curvas de frecuencias de caudales, aguas arriba y aguas abajo del Bernesga, se ilustran en la Figura 29. Cabe añadir que lo que se refiere al Esla se corresponde al estado regulado por los embalses del Porma y Raño.

Tabla 5. Caudales dominantes en los tramos de interés.

río	tramo	Q dominante (m ³ /s)
Bernesga	aguas arriba confl. Torío	162
Bernesga	aguas abajo confl. Torío	308
Torío	aguas arriba confl. Bernesga	146
Esla	aguas arriba confl. Bernesga	400
Esla	aguas abajo confl. Bernesga	708

La Tabla 5 enumera el caudal dominante para todos los tramos del Bernesga, Torío y Esla de interés para el estudio. Es destacable la gran coincidencia entre el caudal dominante del Bernesga en León (162 m³/s) con el caudal asociado a la máxima crecida ordinaria (158 m³/s, ver §4). Esta gran similitud nos da confianza en el valor del caudal dominante del Bernesga aguas arriba de la confluencia con el Torío. La situación es la opuesta en el tramo aguas abajo. Según el estudio de la C.H.D. (SNCZI, 2009), el caudal de la máxima crecida ordinaria para el tramo del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío es sólo de 153 m³/s. Este resultado equivale a decir las crecidas del Torío y el Bernesga están totalmente desacopladas.

10 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS Y OTRAS ACTUACIONES LLEVADAS A CABO

La descripción contenida en este apartado ha sido elaborada a partir de información de proyectos, estudios, planos y fotografías obtenidas de los archivos de la CHD y del Ayuntamiento de León.

A continuación, se hace una descripción cronológica de las distintas actuaciones llevadas a cabo a lo largo del tramo de estudio. El tramo que concentra mayor información es obviamente el de la Ciudad de León, donde se ubica la canalización del río, y el que ha suscitado mayor número de actuaciones.

La canalización del río Bernesga en León tiene en la actualidad una longitud de unos 6.5 km y se extiende desde unos 540 m aguas arriba del puente de Riosol en su extremo superior ($x \approx 17.1$ km) hasta unas decenas de metros aguas arriba de la antigua ubicación del vado destruido en 2014 ($x \approx 10.6$ km). La anchura media de la canalización entre muros es de 80 m aproximadamente. La canalización tal como está en la actualidad no se realizó de una sola vez, sino que se llevó a cabo en cinco fases ejecutadas entre 1911 y 1983.

La primera referencia a la canalización corresponde a un expediente de liquidación de obras (Zumárraga, 1907). El proyecto original, que no ha sido localizado, fue redactado en 1902. Estas obras finalizaron en enero de 1905 y, aunque en un principio comprendían la construcción de dos muros laterales entre los puentes de San Marcos y de los Leones, la solución adoptada fue la de la construcción *“(...) de un muro y un cauce central en la parte aguas arriba del puente de San Marcos para dejar a salvo el edificio y el Vivero del Estado”*. La longitud de la canalización fue de 816 m. La longitud entre puentes es de unos 650 m. Pensamos que el resto hasta alcanzar los 816 m correspondían al muro de la margen derecha que, partiendo del puente de San Marcos hacia aguas arriba, protegía el antiguo Vivero de Obras Públicas, actual parque de Quevedo. En el expediente al que se ha tenido acceso no existe ningún plano de planta. Sí constan planos de los perfiles transversales en los que se aprecian los muros construidos en ambas márgenes y el material aportado de relleno para el trasdós de sendos muros (Figura 30).

En dicha figura se aprecia como en esta primera obra documentada, los muros de la canalización ocupan parte de lo que hasta entonces era espacio fluvial (curva en color negro en la Figura 30). Según consta en el proyecto de 1907, el volumen de material para usar como terraplén ascendió a $64,000 \text{ m}^3$. Por tanto, la superficie transversal media en la que se dispuso este material ocupaba $64,000 \text{ m}^3 / 816 \text{ m} = 78.5 \text{ m}^2$. Si supiéramos la altura media de dicha superficie podríamos conocer la magnitud de la ocupación del cauce que supuso la canalización. Escogiendo como representativa la sección transversal de la Figura 30 (situada unos 280 m aguas abajo del puente de San Marcos), cuyas áreas de terraplén son: $S_{\text{terraplén},M.\text{Izquierda}} = 129.8 \text{ m}^2$ y $S_{\text{terraplén},M.\text{Derecha}} = 35.4 \text{ m}^2$, se estima que el estrechamiento del cauce alcanzó 39 m (24.5 m y 14.3 m en las márgenes izquierda y derecha, respectivamente). Este resultado se obtiene a partir de la escala del plano, deducida a partir de las áreas de terraplén. La escala obtenida se aplica posteriormente la longitud de corrimiento de las márgenes. De esta forma, se obtiene que el espesor del muro es entre 1.1 m y 1.5 m, no muy alejado del valor proyectado (1 m). Del mismo modo, la altura visible de los muros de la canalización es de 4 m (margen izquierda) y 2.5 m (margen derecha).

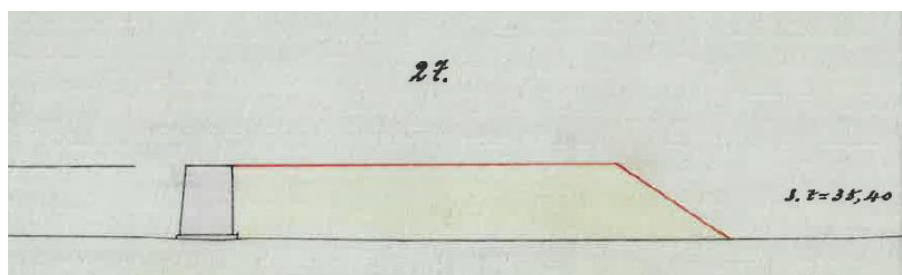
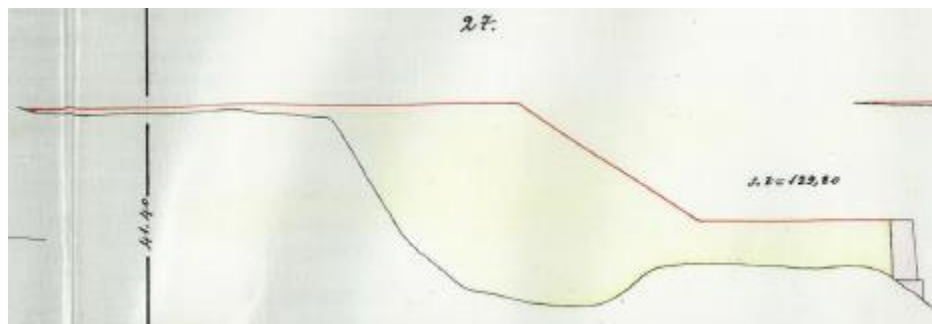


Figura 30. Perfiles transversales de los muros de la margen izquierda (arriba) y derecha (debajo) y de sendos terraplenes construidos en 1907. Secciones del perfil 27 tomadas de (Zumárraga, 1907).

La diferencia de altura entre las orillas de las márgenes izquierda y derecha (más alta la izquierda, Figura 30) es debida a la labor erosiva del Bernesga (Tomé Fernández, 1997).

En 1908 se redacta el proyecto de “Reparación y mejora de la canalización del río Bernesga frente a León” (Pérez de los Cobos, 1908). Según consta en la memoria del proyecto, “[...] *una fuerte avenida en noviembre de 1907 socavó el muro izquierdo de la canalización, agua abajo del puente de San Marcos, ocasionando su destrucción en una longitud de 20 m y afectando a otros 10 m*”. La zona afectada está comprendida entre los puentes de San Marcos y de los Leones. La descripción que se hace del cauce es la siguiente: “*(el Bernesga) llega a la Robla y cambia de aspecto disponiendo para cauce de amplio valle cuyo suelo, de la época cuaternaria, está formado por acarreos del mismo río, sumamente móviles que este, en sus grandes crecidas distribuye caprichosamente fijando de modo eventual uno o varios cauces menores por los cuales discurre en sus aguas medias o bajas*”. El proyecto hace pues una descripción detallada de la morfología de un cauce trenzado que en 1908 gozaba de gran dinamismo.

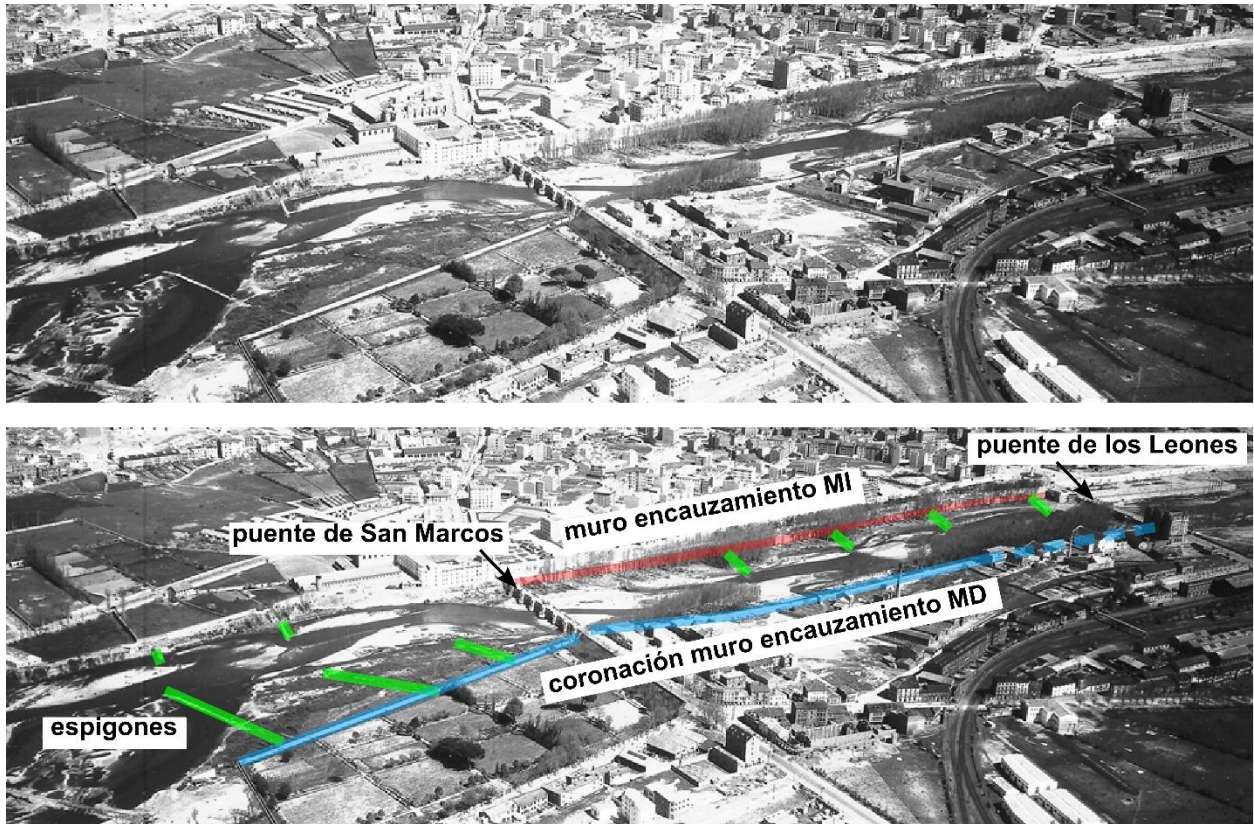


Figura 31. Imagen aérea del Bernesga en León entre los puentes de San Marcos y de los Leones (27 de mayo de 1947). Fuente: Ejército de Aire. La imagen inferior es la misma que la superior, pero se indican: 1) los muros de la canalización de las márgenes izquierda (en rojo) y derecha (en azul) se ubican en el lado interior (hacia el río) de la Av. de Sagasta y del Paseo de Salamanca, respectivamente y 2) los espigones (verde) del proyecto de canalización de 1910.

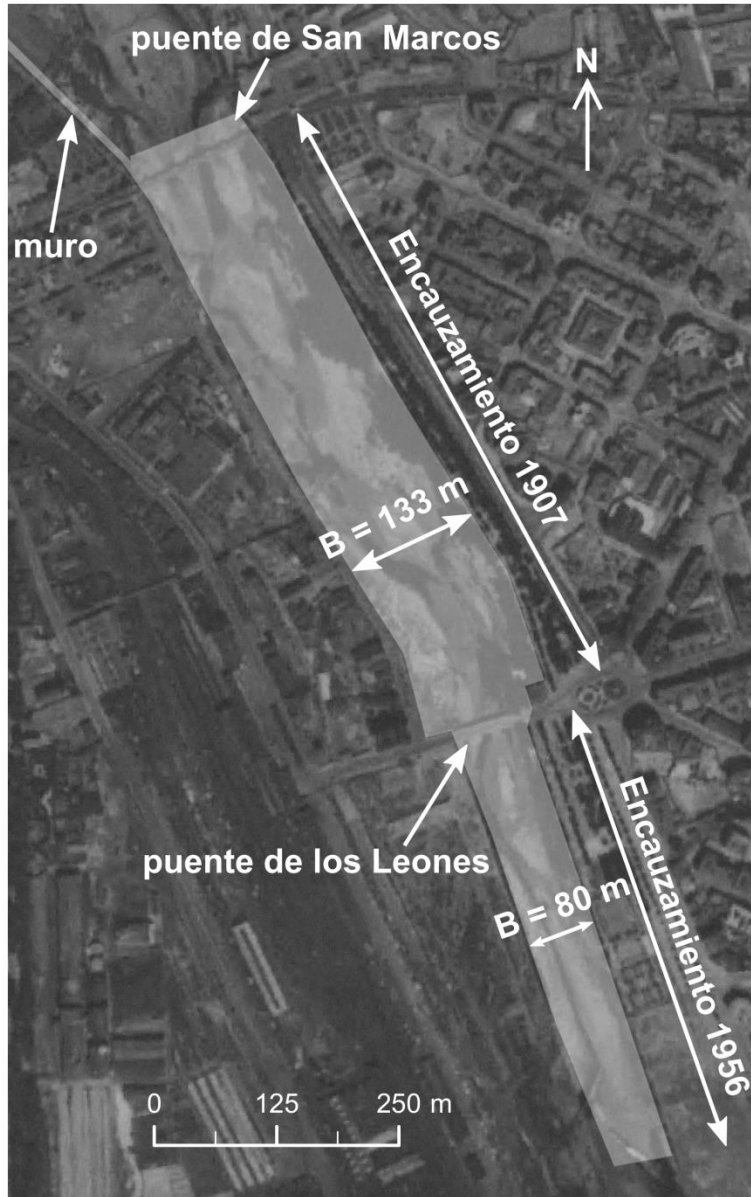


Figura 32. Canalización del río Bernesga dibujada sobre la fotografía aérea de 1956. Se aprecia cómo la anchura de la primera fase de la canalización (tramo entre puentes) es mayor que la anchura del tramo aguas abajo del puente de los Leones. Este segundo tramo está en ejecución en 1956. En fotografías aéreas de años posteriores se aprecia su progresión hacia aguas abajo.

Como antecedentes a las obras de reparación, el proyecto cita que la Ciudad de León cree haber solucionado los problemas de erosión en las orillas del Bernesga mediante *“dos hermosos (sic) muros de canalización que limitan el cauce de avenidas entre los puentes de San Marcos y*

de hierro". Este último nombre hace referencia al puente de los Leones o de la Estación. Se cita también en el proyecto la presencia de múltiples cauces en el tramo canalizado del Bernesga. El río de entonces, ya canalizado mediante muros, todavía tenía la morfología de cauce trenzado descrita anteriormente. Fue precisamente uno de estos cauces el que, orientando el flujo contra el muro izquierdo, causó los daños objeto de reparación. En el momento de la visita de campo (noviembre de 1907), los ingenieros de la Jefatura de Obras de Públicas de León temen el colapso parcial del puente de San Marcos por la socavación de las pilas segunda y tercera (desde la margen derecha). En esta descripción, también subrayan el estado precario de la aleta del estribo izquierdo, socavado en una longitud de unos 25 m.

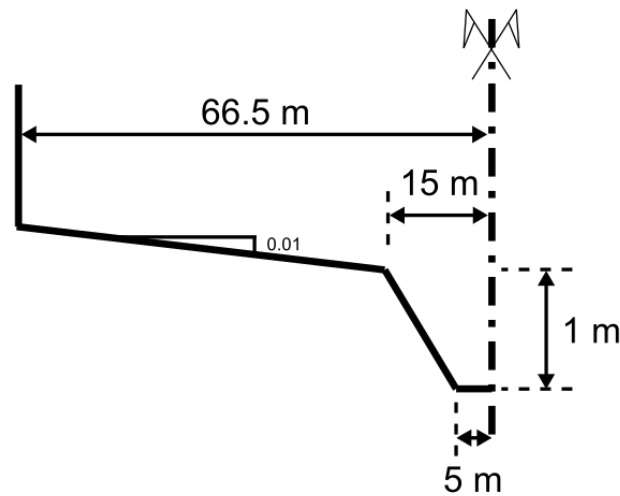


Figura 33. Sección transversal tipo de la canalización del Bernesga entre los puentes de San Marcos y de los Leones proyectada en 1908 (Pérez de los Cobos, 1908).

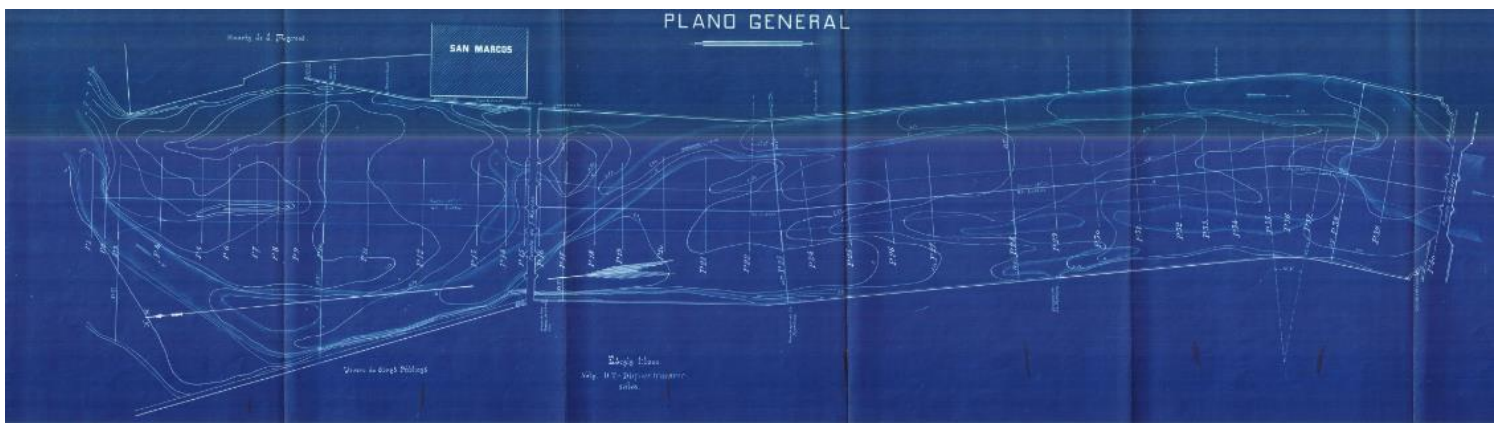


Figura 34. Planta del Proyecto de reparación de la canalización de 1907 (Pérez de los Cobos, 1908). El perfil 27 del proyecto original está situado unos 280 m aguas abajo del puente de San Marcos (Figura 30).

Del escrito en el proyecto de reparación, parece adivinarse que la anchura del cauce entre muros fue de 133 m. Esta anchura, medida sobre el plano de planta de la Figura 34 (de 1908) alcanza 129 m, una cifra casi igual. Esta anchura coincide con la distancia entre los lados interiores (hacia el río) de la Av. Condesa de Sagasta y del Paseo de Salamanca y se ha podido documentar fotográficamente (Figura 31 y líneas roja y azul en la Figura 32). La pendiente longitudinal del cauce proyectado fue de 0.00508 m/m.

El proyecto inicial de 1907 también habría implicado la construcción de un cauce central para las avenidas ordinarias. Parece que este cauce central podría haber tenido una anchura un poco mayor, de 50 m en la base y taludes 3H:2V y una profundidad de apenas 0.5 m. La crecida de 1907 habría dejado invisibles las formas de este cauce central. El proyecto de 1908 contempla la sustitución de este cauce central por otro de 10 m de anchura en la base y 30 m en su parte superior y 1 m de profundidad (Figura 33). La dimensión superior, sobre el plano de planta de la Figura 34 (de 1908) son 29 m, una cifra casi igual. Además de este cauce central, el proyecto contemplaba la construcción de 6 espigones o diques transversales de gaviones (de Llanos y Silvela, 1940, quien los cita) que, orientados hacia aguas arriba (Figura 31) desde los muros exteriores de la canalización y con una cierta pendiente de su coronación hacia el río, alcanzarían “los malecones sumergibles que delimitarían el cauce central”. Estos diques, también denominados “maestras”, se proyectaron orientados hacia aguas arriba y serían los que se observan en verde en la fotografía de 1947 (Figura 31). Por último, el proyecto de reparación también contemplaba el descenso de los cimientos del muro de canalización sin alcanzar la roca, “[...] que se halla a una profundidad de 4 m”. La canalización se finalizó en julio de 1911 (de Llanos, 1940). Parece que para entonces los espigones (maestras) contempladas en el proyecto todavía no se habían ejecutado.

En marzo de 1914, se aprueba un proyecto de reparación y mejora de la canalización del río Bernesga frente a León. Estas obras, casi terminadas en mayo de 1917 (Corral, 1917),

consistieron en 8 pares de espigones (ya proyectados en 1908 y visibles en la fotografía aérea de 1947, Figura 31). En la fecha de redacción del proyecto, solo queda pendiente ejecutar las defensas de las pilas de los puentes de San Marcos y de los Leones. El objeto del proyecto es construir un nuevo espigón transversal y reconstruir una parte dañada del muro de la margen derecha de la canalización. Este nuevo espigón está situado aguas arriba del muro de la margen derecha que protege el parque de Quevedo (antiguo Vivero), Figura 35. La Figura 36 es una imagen tomada del Bernesga (no sabemos la fecha) donde se observan los espigones construidos a principios del s. XX.

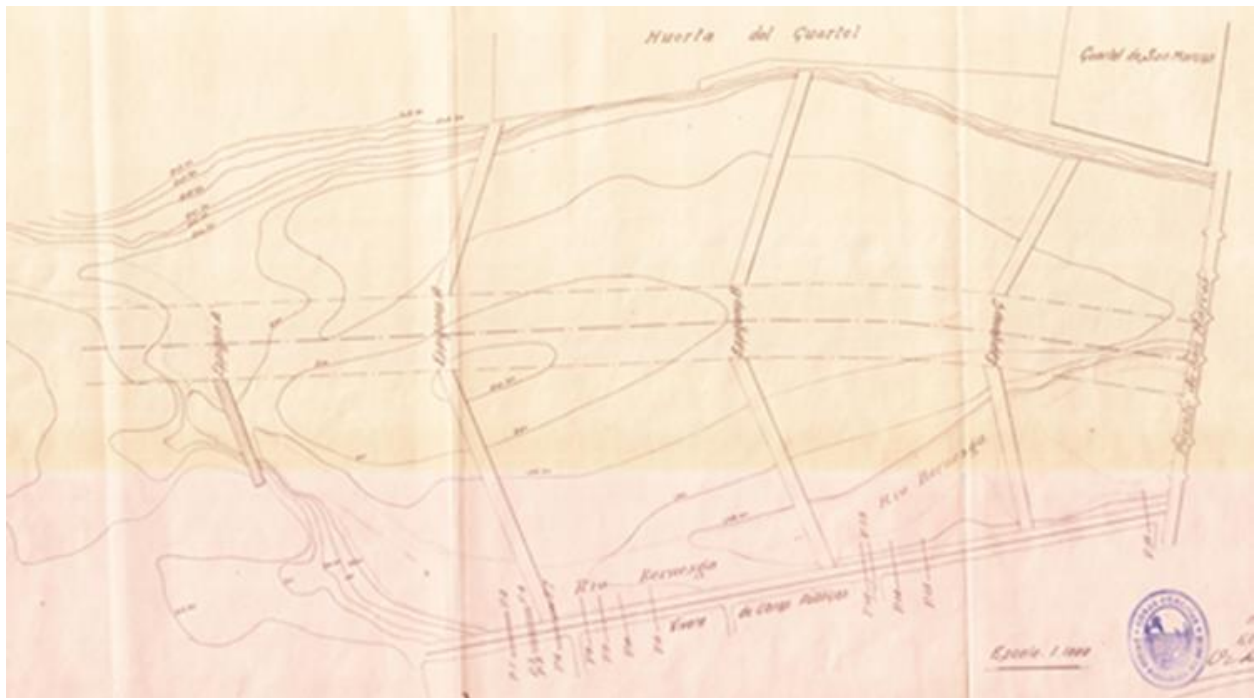


Figura 35. Planta de los 6 espigones construidos a raíz del proyecto de 1908 (aguas arriba del puente de San Marcos) y del nuevo espigón transversal (rayado) situado aguas arriba. En el centro con líneas discontinuas, el cauce central de 30 m de anchura proyectado en 1908. El agua circula de izquierda a derecha. Plano tomado de Corral (1917). No se sabe el motivo del aumento de anchura del cauce respecto a los 10 m del tramo aguas abajo del puente de San Marcos.



Figura 36. Vista hacia aguas arriba de los espigones orientados ligeramente hacia aguas arriba que arrancan desde la margen izquierda del cauce (derecha de la imagen). Al fondo a la derecha de la imagen el hospital de San Marcos y el puente homónimo. Fuente: Catálogo de defensas fluviales (A. Bianchini, Ingenieros S.A., Barcelona).

En 1940 se proyecta la construcción de nuevo espigón en la margen derecha del tramo entre el puente de San Marcos y el de los Leones (de Llanos y Silvela, 1940). Dicho espigón, situado entre otros dos (proyectados en 1908 y finalizados en 1917), está situado inmediatamente aguas arriba del tramo de muro, de 32 m de longitud, dañado y objeto de reparación. La distancia original entre espigones es de 125 m (¿es esta distancia aplicable al resto de espigones proyectados en 1908?), quedando ahora reducida a la mitad.

La siguiente imagen de que se dispone data de 1948 (Figura 37), un año después de la anterior (Figura 31), y en ella se observa cómo los espigones de la margen izquierda han favorecido la sedimentación hasta el punto de quedar cubiertos por el material acumulado y desaparecer de la vista, aguas abajo del puente de San Marcos. Esta circunstancia, podría haber contribuido a que estas zonas fueran repobladas con árboles en 1960 (Azcarretazabal, 1960).



Figura 37. Imagen aérea del Bernesga y de la Ciudad de León al fondo y el puente de San Marcos en primer plano. La imagen fue tomada el 20 de octubre de 1948. Fuente: ejército del Aire. Comparar con Figura 31.



Figura 38. Fotografía aérea tomada en junio de 1959 del Bernesga y del puente de Leones. El agua circula de derecha a izquierda. La imagen muestra claramente la reducción de anchura de la canalización aguas abajo del puente respecto a la del tramo aguas arriba. Se aprecia también en la fotografía un espigón en la margen derecha y aguas arriba del puente, construido entre 1914 y 1917. Finalmente, también se ven dos espigones, más cortos y perpendiculares al muro de la misma margen derecha en el extremo superior de la fotografía, aguas abajo del puente.

Fuente: Ejército del Aire.

Las siguientes referencias corresponden a la década de 1950. En la fotografía del vuelo americano (1956) (Figura 32) se aprecia como la canalización de 1911 (que alcanzaba al puente de los Leones), se prolonga hacia aguas abajo en una distancia indeterminada sin alcanzar el puente de la carretera N-630 (también llamado de circunvalación). La distancia entre éste último y el puente de los Leones es aproximadamente 1175 m (Tabla 2). No se ha conseguido el proyecto de este tramo de la canalización. Solo se ha encontrado un breve informe de 1945 de autorización, por parte de la Jefatura de Aguas de la cuenca del Duero, de la construcción del muro de la margen izquierda por el Ayuntamiento para favorecer la urbanización de dicha zona. Con la fotografía aérea de 1956 y las secciones transversales del modelo Hec-Ras y las del proyecto Linde de 1995 (ver §5), se estima su anchura en unos 80 m, que coincide con la anchura de la canalización actual de todo el tramo urbano del Bernesga. Según Palancar Panella (1964), la anchura de la canalización es de 76 m. La reducción de anchura entre el tramo aguas arriba y aguas abajo del puente de los Leones se aprecia claramente en la Figura 38: compárese la posición del muro de la margen derecha aguas arriba y aguas abajo del puente. En ella se aprecia también cómo el muro de la margen derecha aguas arriba del puente está poco definido, y también el espigón orientado hacia arriba, construido entre 1914 y 1917 (y proyectado originalmente en 1908). Como no se ha encontrado el proyecto de esta segunda fase de la canalización, no sabemos el porqué de esta reducción de anchura. Podría haber sido para que el muro de la canalización estuviera alineado con el extremo del estribo derecho (Figura 38). La Figura 38 también deja ver que el muro de la margen izquierda (del que solo se observa la barandilla que lo corona) parece estar alineado con el respectivo estribo del puente. De hecho, ya en 1946 se aprecia que este último muro de la margen izquierda ya había sido

construido (Figura 40). En el proyecto de canalización de 1908 se describe que su alcance es “entre los puentes de San Marcos y de hierro”. Éste último se refiere a un antiguo puente construido en 1863, de hierro (Figura 39), situado dónde se encuentra el actual de los Leones que daba acceso desde la ciudad a la estación de ferrocarril, finalizada en 1862 (Tomé Fernández, 1997). La cimentación de una pila y una parte del tablero tuvo que reconstruirse en 1870 por socavación del apoyo (Fernández Ordóñez et al., 1988). El puente original de hierro tenía una luz (“desagüe”) de 55.5 m (Pérez de los Cobos, 1908). La estación del ferrocarril, ocupando la parte más exterior del cauce divagante del Bernesga ya consta en el un plano de 1962 (Tomé Fernández, 1997), en lo que podría definirse como la primera invasión del río por la margen derecha. El puente fue reformado en 1935, momento en que la celosía metálica fue substituida por tres tramos de hormigón armado de 21 de longitud cada uno (Fernández Ordóñez et al., 1988). El puente actual es producto de una ampliación finalizada, según Fernández Ordóñez et al. (1988) “en fechas recientes”.



Figura 39. Imagen del puente de hierro construido en 1963 para comunicar la estación del ferrocarril en la margen derecha con la Ciudad de León. Imagen tomada de Tomé Fernández (1997).

Así, el puente actual, de hormigón y visible en 1959 (las fotografías de 1946 -Figura 40- no permiten verlo) fue construido en 1935 (con reformas posteriores que no cambiaron sus características): tres vanos de 21 m cada uno. La distancia entre muros de la canalización es de 80 m. Es decir que los estribos del puente invaden el cauce definido entre muros unos 8.5 m en las márgenes izquierda y derecha, respectivamente. La conclusión sobre el porqué de la reducción de anchura de la canalización que podemos conjeturar es que por algún motivo que desconocemos, el antiguo puente de hierro de 55.5 m fue substituido por el actual de hormigón, un poco más largo (~63 m), y que la continuación de la canalización hacia aguas abajo se llevó a cabo tomando esta dimensión como la necesaria (o una dimensión suficiente) para asegurar la capacidad de desagüe del río.

Los muros de la canalización aguas abajo del puente de los Leones son de 3 m altura y en 1964 falta por terminar la parte más cercana al puente de la N-630 por la margen derecha (Palancar, 1964).

En el 1960 se redacta el proyecto de defensa de márgenes entre el puente de carretera N-630 (o de la circunvalación) y la confluencia con el Torío. El puente que da inicio al tramo fue construido alrededor de 1956 (en la fotografía aérea se ve en obras) y substituye a otro anterior que podría haberse construido en 1922 (Figura 41). Según consta en el proyecto, en 1960 se está terminando la ejecución de la segunda fase de la canalización entre el puente de los Leones y el de la carretera N-630. Estas obras se aprecian en la fotografía aérea de 1964 (Figura 41c) y en una anterior de 1959 (Figura 42). La canalización de este tramo también incluía la construcción de 22 espigones, perpendiculares y orientados a contracorriente, aunque solo en la margen derecha (uno de ellos se ve en la Figura 38). Los terrenos de ambas márgenes objetos en el tramo de río donde se ejecutan las obras eran propiedad del Ayuntamiento que los consorció con la Confederación Hidrográfica del Duero para su repoblación en 1932 y siguientes. El proyecto incluye la construcción de un muro lateral en la margen izquierda que,

partiendo del estribo del puente, dé continuidad al muro de la canalización del tramo anterior aguas arriba del puente de la carretera N-630. La Figura 43 ilustra el estado de las obras de canalización en el momento de la redacción del proyecto (1960). El muro de la margen derecha se finaliza en 1968, fecha en la que la segunda fase de la canalización entre los puentes de los Leones y de la N-630 ya se ha ejecutado (Ayuntamiento de León, 1968).

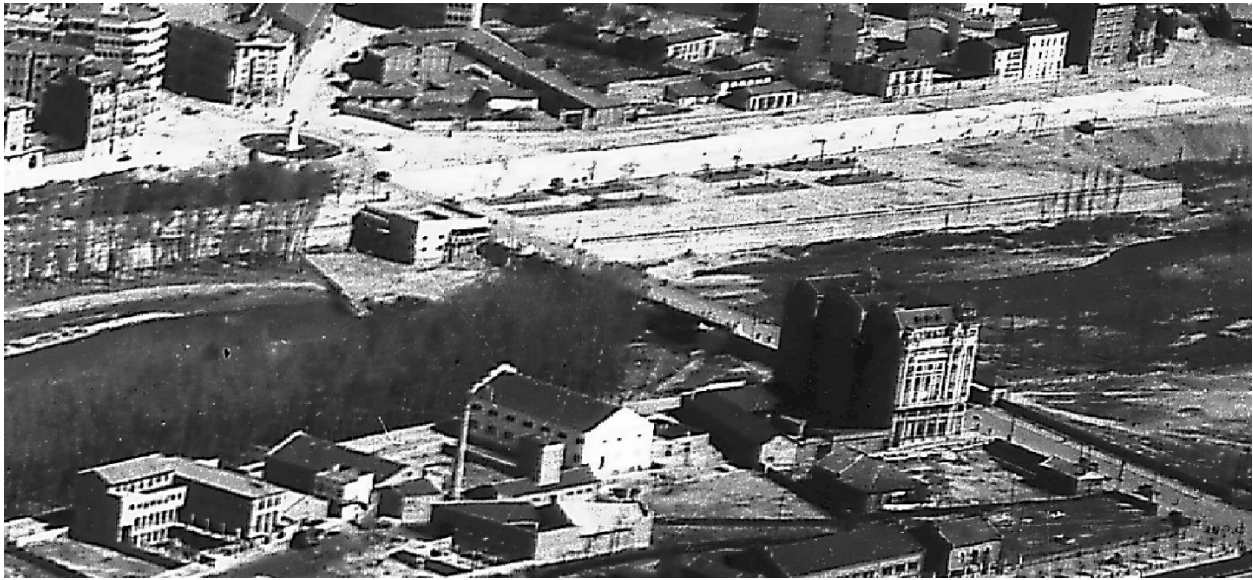


Figura 40. Fotografía aérea del Bernesga y del puente de los Leones. Se trata de una ampliación de la Figura 31. La imagen fue tomada mayo de 1946. El agua circula de izquierda a derecha. Destaca en primer plano el espigón orientado hacia arriba en la margen izquierda (¿simétrico respecto al de la Figura 38?). Aguas abajo del puente y en la misma margen izquierda se aprecia cómo el muro de la canalización ha avanzado hacia el río (respecto a la posición del muro aguas arriba del puente). La vegetación de la margen derecha impide ver si, como sospechamos, el muro está alineado con el estribo izquierdo del puente. Fuente: Ejército del Aire.

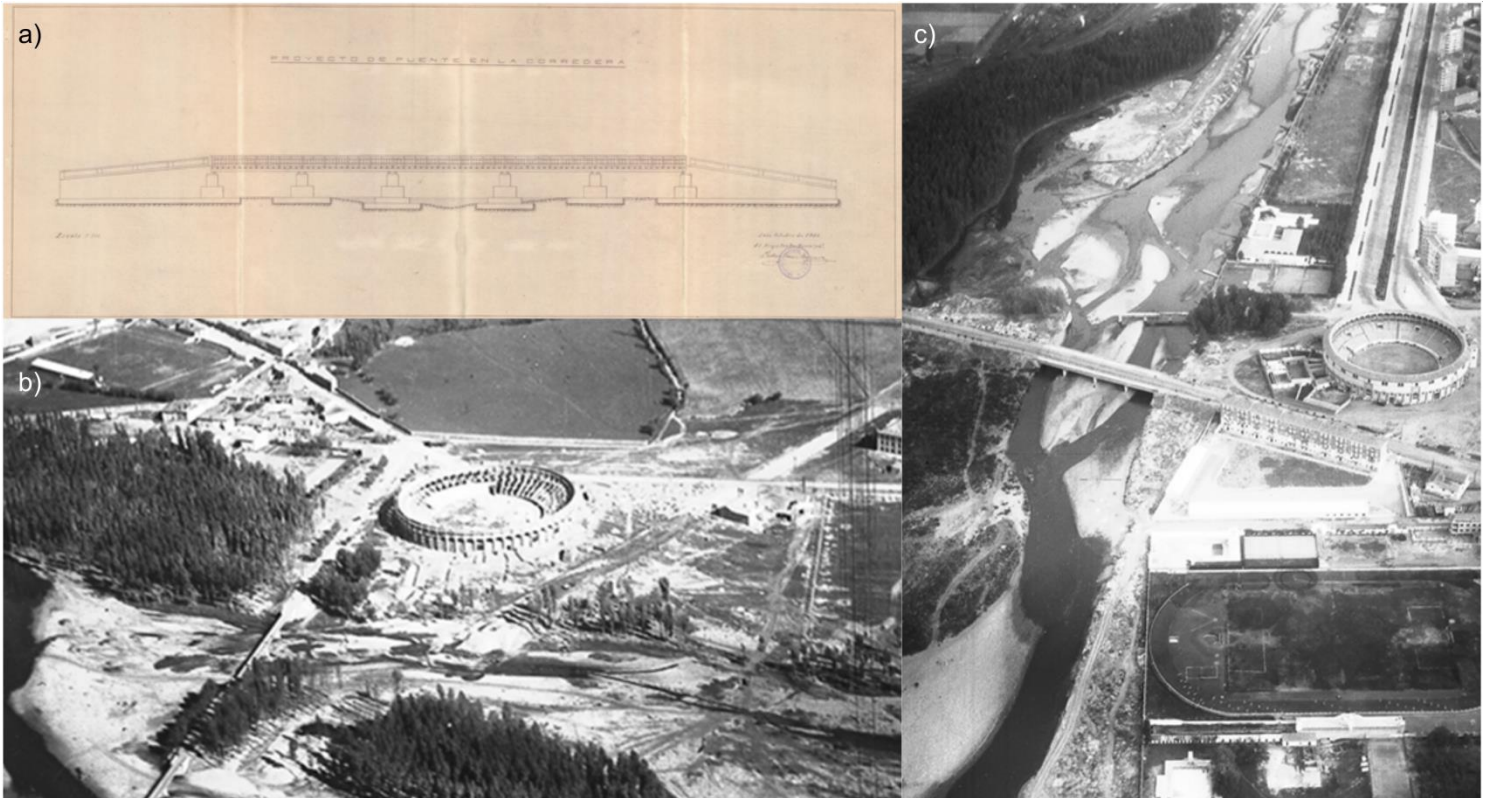


Figura 41. a) plano del puente original de 1922 del puente aguas arriba de la carretera N-630. b) fotografía aérea de noviembre de 1948. El agua fluye de izquierda a derecha y de arriba abajo. Obsérvese la ubicación del antiguo puente en relación a la plaza de toros y a las obras de la explanación de la carretera N-630 (circunvalación). Según esta fotografía, el puente (o sus accesos) era mucho más largo que lo delineado en el plano de 1922 de la imagen a). Podría ser que el puente en 1948 alternara tramos en terraplén para salvar el ancho del río. c) fotografía aérea de mayo de 1964. El agua fluye de arriba a abajo. En primer plano se ubica el puente nuevo de la carretera N-630 (ya finalizada), detrás los restos del puente antiguo y de ahí hacia aguas arriba, los muros y los espigones de la canalización del Bernesga. Nótese también la desaparición en 1964 del gran depósito de material aluvial, parcialmente ocupado por bosque de ribera que en 1948 ocupaba el espacio entre el río y la plaza de toros. Fuente: Ejército del Aire.



Figura 42. Fotografía aérea del Bernesga del tramo entre el puente de los Leones y el puente de la carretera N-630 (a la derecha, junto a la plaza de toros). El edificio de la izquierda de la imagen es el de la Figura 38 y Figura 40. Imagen tomada en junio de 1959. El agua circula de derecha a izquierda. Fuente: Ejército del Aire

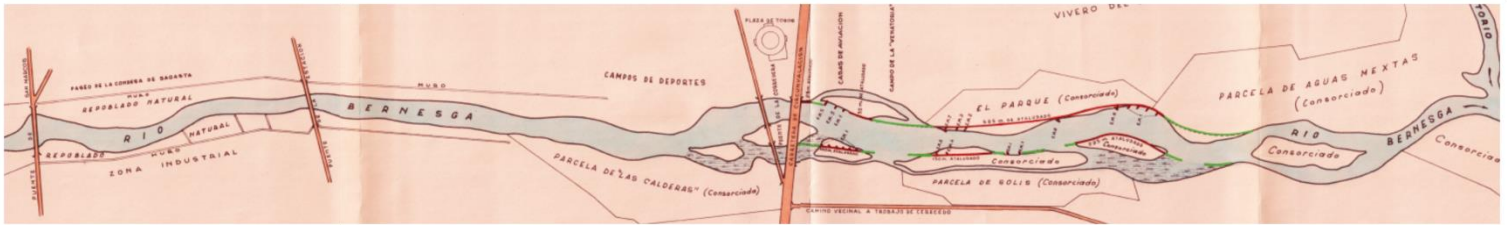


Figura 43. Plano de planta de las obras de fijación de márgenes (Azcarretazabal Mantecor, 1960). Nótese que la longitud de los muros de la margen izquierda y derecha entre el puente de los Leones y el puente de la N-630 se ajusta a la imagen de 1959 (Figura 41d y Figura 42). El río aún tiene una morfología trenzada en la parte no canalizada.

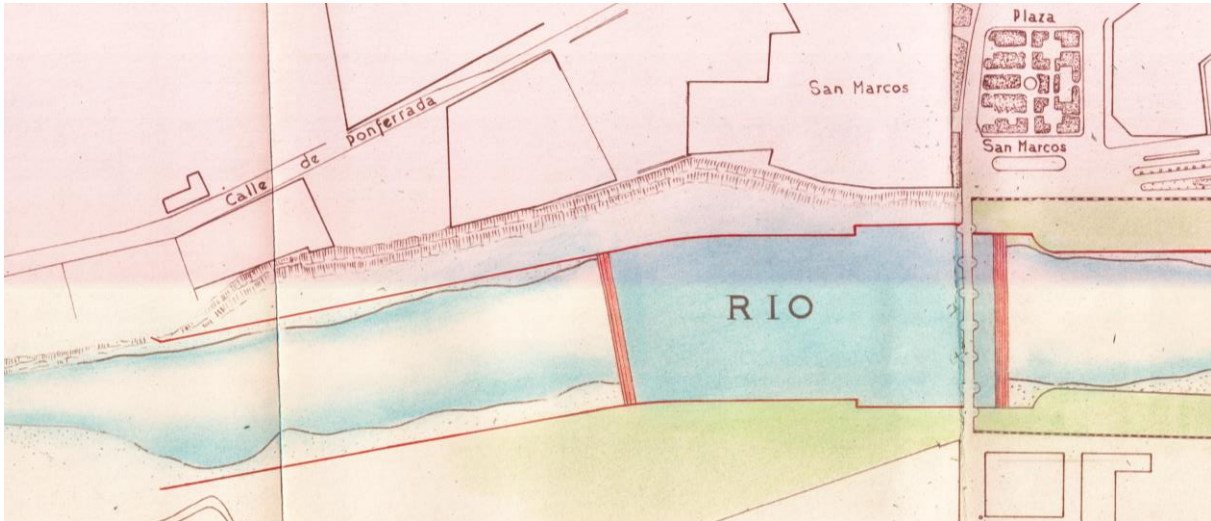
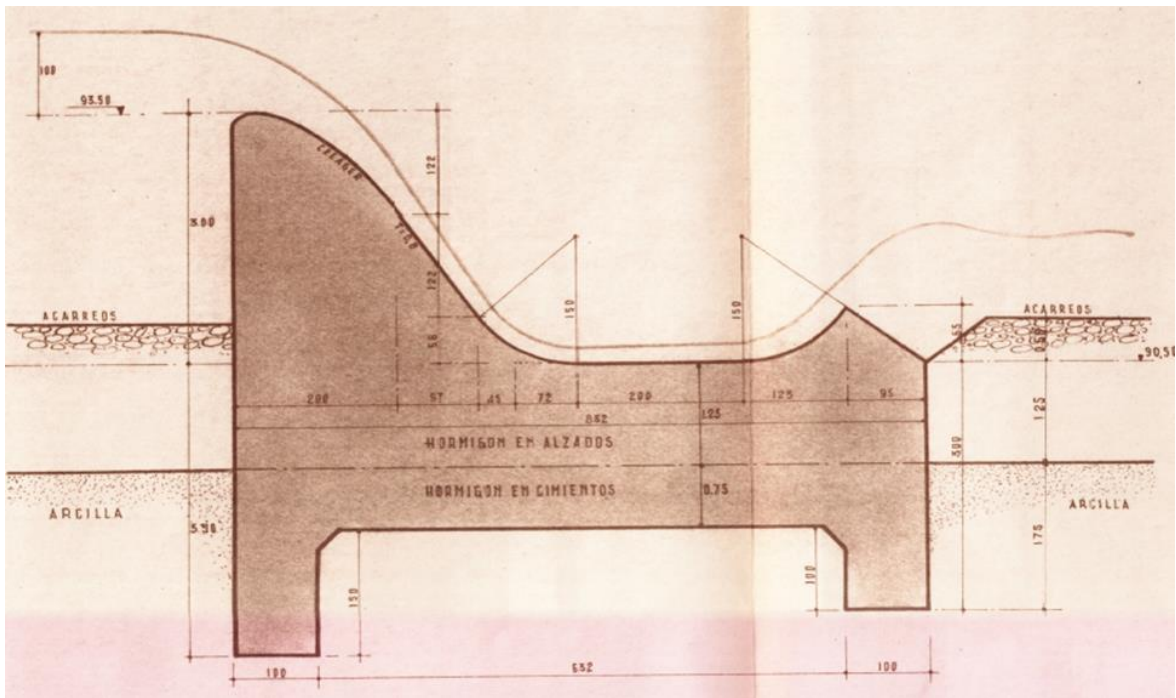


Figura 44. Prolongación de la canalización del Bernesga aguas arriba del puente de San Marcos. Las dos barreras transversales representan los dos azudes proyectados (Palancar, 1964): el de aguas arriba es el azud de gaviones mientras que el situado aguas abajo es el propio azud de San Marcos, demolido parcialmente en 2013. El agua discurre de izquierda a derecha.

El año 1964 se redacta un nuevo proyecto de encauzamiento del Río Bernesga en León frente al edificio de San Marcos (Palancar, 1964). La liquidación del proyecto es de 1970. El proyecto prolonga, en una longitud de 260 m aguas arriba, la canalización existente hasta ese momento (inicialmente de una longitud de 213 m, desde el puente de San Marcos hacia aguas arriba – proyecto de 1908 y ejecutado casi al completo en 1917-). La longitud total de la nueva canalización asciende pues a 460 m. Entre ambos tramos se construye un nuevo azud somero de gaviones para impedir el paso de sedimento y facilitar su extracción. El proyecto también incluye la construcción del azud de San Marcos. El objetivo del azud es, además de proteger la cimentación del puente de San Marcos y los muros de canalización aguas arriba, “(...) *obtener una zona de recreo, remansar el agua y mejorar estéticamente el conjunto*” (sic). El azud tiene una longitud de coronación de 100 m (como en la actualidad) y altura desde coronación a

cimientos de 6.5 m (Figura 45). La sección transversal incluye una compuerta en la parte central. Esta altura difiere de la altura del proyecto de demolición del azud de 2013 (Santillán y Anta, 2013) que, según la topografía que adjuntan, asciende a 6 m (Figura 45). La diferencia entre ambas secciones transversales está en el espesor de la solera del cuenco amortiguador (aguas abajo de la cresta), que se construyó con un espesor de 1.5 m en lugar de los 2 m proyectados en 1964. Finalmente, obsérvese en la sección transversal de 1964 que el espesor de la capa aluvial sobre la arcilla del terciario era de 1.75 m. El azud es visible por primera vez en la fotografía aérea de 1977.



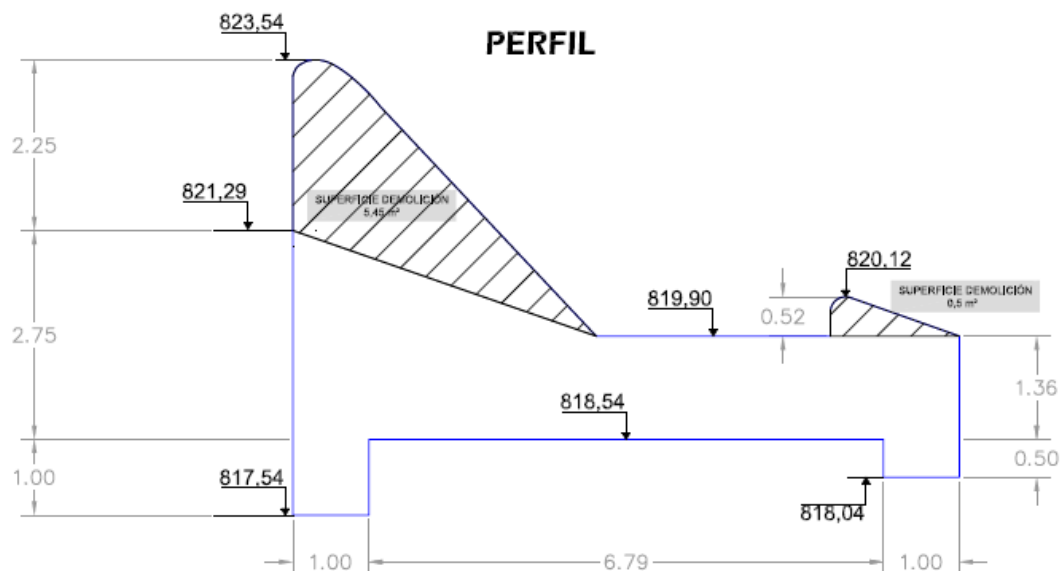


Figura 45. Sección transversal del azud de San Marcos. Plano del proyecto del azud (arriba). Plano del proyecto de demolición parcial del azud (abajo). Las partes rayadas corresponden a las zonas del azud que fueron demolidas (Santillán y Anta, 2013).

El material acumulado aguas arriba del azud de San Marcos era dragado periódicamente (cada 2 o 3 años). Estos dragados se hacían constar como expedientes de obras en cauce (“limpiezas”). Es por este motivo por el que no se ha podido documentar el volumen de material extraído con estos fines.

Por último, en 1964, el proyecto contempla la construcción, en la margen izquierda, de un muro de 650 m entre el puente de San Marcos y el puente de los Leones. Este muro tiene por objeto “revalorizar estéticamente la zona urbana alrededor del complejo de San Marcos”. Según el proyecto, el muro de la margen derecha está siendo ejecutado por el Ayuntamiento de la Ciudad en el momento de la redacción del proyecto (en un informe de liquidación se dice que las obras del muro derecho finalizaron en 1966). Cabe recordar en este punto que la canalización de este tramo del Bernesga ya se llevó a cabo en 1908 (Figura 30, Figura 31 y Figura 32). La pendiente longitudinal del río en la base de la margen izquierda en la que se construye el nuevo muro es de 0.0048 m/m.

El tramo de la canalización aguas arriba del azud de San Marcos ($L = 213$ m), tendrá, según el proyecto, una anchura entre 106 m y 96 m. Los muros de la canalización se cimientan sobre la arcilla del terciario que, en fecha del proyecto, se encuentra a 1.8 m de profundidad.



Figura 46. Obras de la nueva canalización entre los puentes de San Marcos y de los Leones. El agua circula de abajo a la derecha hacia arriba a la izquierda. Fotografía tomada en agosto de 1966. Comparar con Figura 31. Fuente: Ejército del Aire.

La Figura 46 ilustra cómo la segunda canalización del río en este tramo supuso una reducción de la anchura del río de más de 50 m: la anchura de la primera canalización (de 1908) era de 133 m mientras que esta segunda obra da continuidad a la canalización del tramo aguas abajo del puente de los Leones quedando su anchura en 80 m (la misma que la del tramo inferior). Esta es la anchura de la canalización actual. Nótese en las obras de la Figura 46 cómo la reducción de la anchura del cauce se produce por ambas márgenes y cómo el lecho, no solo en ese tramo sino también aguas arriba del Hostal de San Marcos, está completamente removido, sin apenas aguas, y con trazas del paso de camiones pesados, seguramente, y entre otros motivos constructivos, para extraer material del fondo para el hormigón de los muros y como material

de relleno en sus trasdós. En este sentido, el proyecto contemplaba mover 50,000 m³ para *“regularizar el cauce”* (sic). Las obras del muro de la margen izquierda finalizaron en 1970.

En 1965 se redacta el Proyecto de canalización del Río Bernesga en el Término de Onzonilla (León) (situación en Figura 1) (López de Sosoaga, 1965). La obra proyectada consiste en *“un dragado para llevar el río a su antiguo cauce, diques laterales en ambas márgenes para proteger la parte cóncava de dos curvas y 15 espigones de 30 m de longitud, afectando en total a 1800 m”*. El proyecto calcula que no toda la grava procederá del cauce en las inmediaciones. No se da información sobre el volumen de grava dragado. Las obras se terminan en diciembre de 1969.

En 1968 el Ayuntamiento de León redacta el proyecto de canalización del río Bernesga y del río Torío a su paso por León (Palancar, 1968). Este proyecto comprende la canalización de 1.6 km del río Bernesga (entre el puente de la carretera N-630 y la confluencia con el Torío) y los últimos 1.4 km de éste último, Figura 47. El extremo inferior de la canalización está situado 98 m aguas abajo de la confluencia de ambos ríos (Figura 47). Es destacar que las alineaciones son rectas y que el área canalizada tenía la morfología trenzada que hemos visto en la Figura 43. El objetivo de la canalización es, igual que para los tramos superiores, favorecer la expansión y la urbanización de León. La canalización impone al Bernesga una anchura de 76 m (la misma que la de la canalización del Bernesga entre los puentes de San Marcos y de la N-630). La anchura entre muros del Torío es de 80 m. En ambos ríos se proyecta también un cauce menor entre muros de 40 m y 50 m de anchura y 1.6 m de profundidad (Bernesga y Torío, respectivamente). La fijación de estos cauces se hace mediante espigones de gaviones que, perpendicularmente desde ambos muros, alcanzan sendas márgenes de los cauces menores. La longitud de los espigones del Torío es de 15 m (18 m en el Bernesga). La pendiente longitudinal proyectada es de 0.004 m/m para el Bernesga y 0.0038 m/m para el Torío. El proyecto cuantifica en 166,500 m³ el volumen de desmonte necesario para *“materializar el cauce”*.

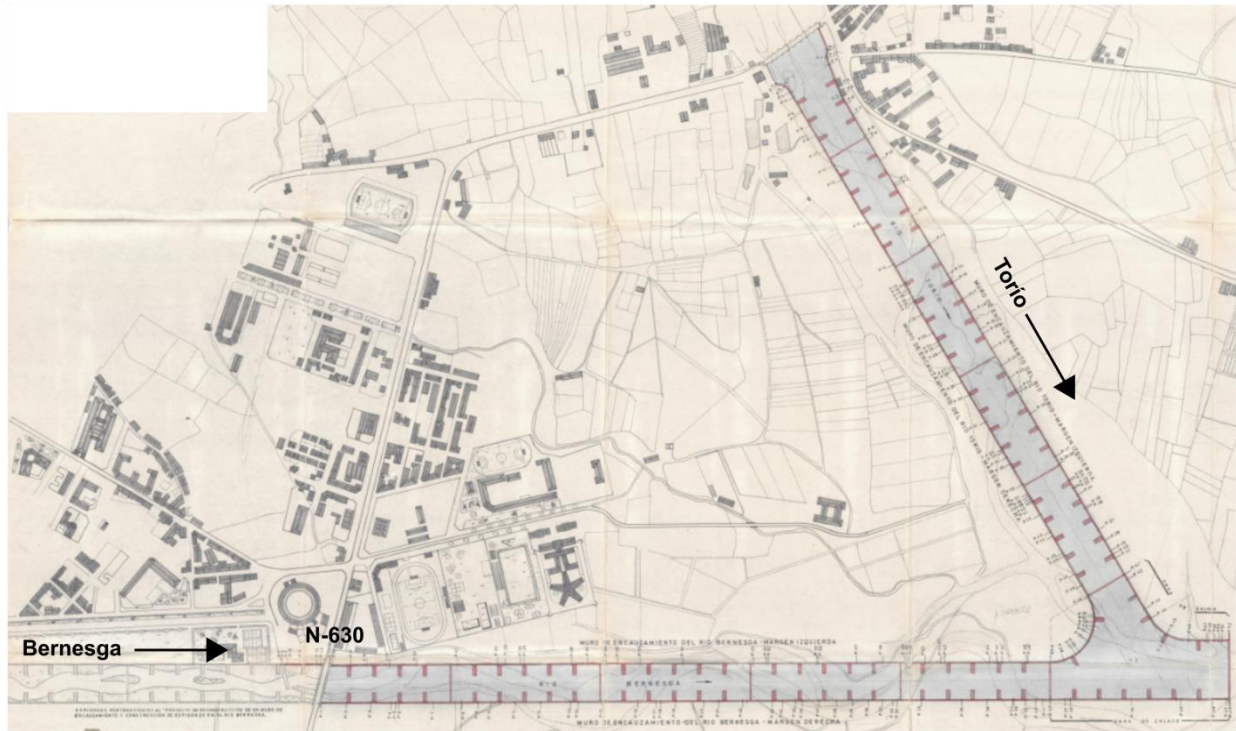


Figura 47. Planta de la canalización de los ríos Bernesga y Torío en León (Palancar, 1968). Véase que aguas arriba de la N-630 ya aparece la canalización de la fase previa como ejecutada. Nótese también que la distancia entre maestras confrontadas es la misma en las dos fases de la canalización, entre 40 y 50 m.

La incisión del Bernesga (¿también del Torío?) ya era motivo de preocupación en 1968: “*para luchar contra descenso general del lecho del río (...) se proyecta una maestra [es decir, una traviesa] completa de hormigón en substitución de una pareja de espigones aprovechando una zona en la que la arcilla no está muy profunda*”. La arcilla hace referencia a la capa del material terciario bajo el material aluvial del cuaternario. Esto indica que una parte (seguramente ya significativa) de este último material ya se había agotado. La traviesa estaba situada en el extremo inferior de la canalización, unos metros aguas abajo de la confluencia con el Torío. Hacemos notar la incoherencia entre la traviesa que se menciona en el proyecto y las 11 traviesas (6 en el Bernesga) que se aprecian en la Figura 47. Las traviesas que se proyectan son las que se observan en la actualidad (Figura 48).

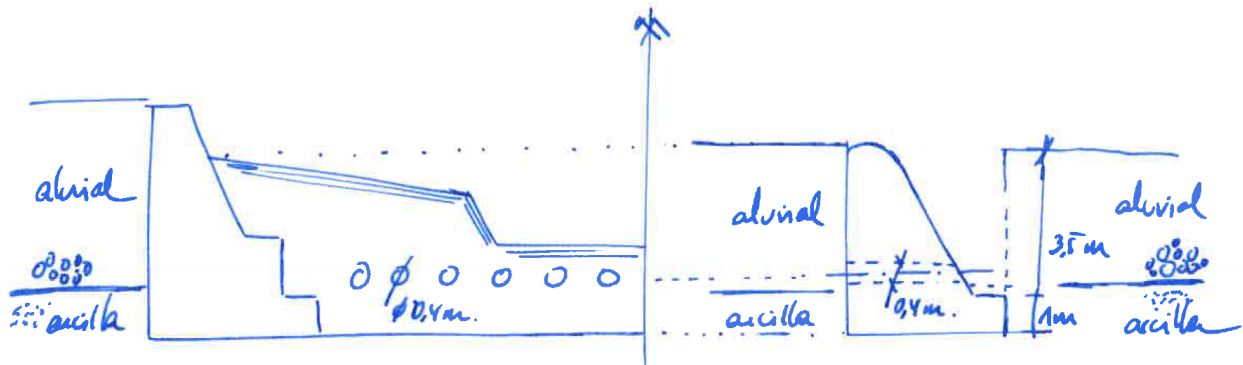


Figura 48. Vista desde aguas abajo de una de las traviesas proyectadas según el proyecto de canalización de 1968. Fotografía tomada el día 1 de octubre de 2018 (arriba). Alzado frontal y corte transversal de las traviesas proyectadas (o perfil longitudinal del río por una traviesa) (Palancar, 1968), según nuestro croquis obtenido del proyecto original.

El proyecto de 1968 se reforma en 1971 (Pérez Alfonso, 1971). Este reformado se centra en las obras de definición de “*un cauce de niveles bajos con sección trapecial doble*” que se consigue con: 1) espigones hechos con gaviones, 2) maestras (traviesas) de hormigón y 3) dragado de material del cauce para obtener las rasantes definidas. Las obras del proyecto de 1968 no habían empezado en marzo de 1971. Un plano de planta de la zona de julio de 1972 tampoco muestra que las obras hubieran comenzado (Ayuntamiento de León, 1972). Este proyecto reformado aumenta el volumen de material que debe dragarse de los 166,500 m³ inicialmente contemplados hasta alcanzar 327,000 m³. Las obras de este proyecto finalizan en 1973.

En 1968 también se redacta el proyecto de construcción del azud aguas abajo del puente de los Leones (Figura 4). Para entonces, el azud de San Marcos ya ha sido ejecutado. El objetivo del azud es doble: “*proteger por una parte las cimentaciones construidas (de la canalización) y de las pilas del puente de la Estación (de los Leones) al evitar la socavación directa y, por otra parte, remansar el agua, embelleciendo el tramo urbano de río*” (sic). La sección transversal del

azud es la misma que la del de San Marcos (Figura 45) y está cimentado sobre la capa de arcilla del terciario, que según los sondeos, se encuentra a 0.75 m de profundidad. Según un croquis de la sección transversal al flujo del río para el cálculo hidráulico del azud, la pendiente del río en el tramo aguas abajo es 0.0035 m/m. Sin embargo, esta pendiente es, según un plano longitudinal del tramo de 0.0042 m/m. Según el mismo perfil, la pendiente del río en el tramo entre puentes es 0.0026 m/m.

En 1972 se redacta un proyecto de construcción de un paseo aguas arriba del puente de San Marcos, en una longitud de unos 2.4 km (Ayuntamiento de León, 1972). El proyecto prevé la *“eliminación de meandros, dejando un mínimo de curvas, de gran radio de curvatura”*. Además del vial, el proyecto plantea la protección lateral de la margen con un muro de hormigón, con la cimentación empotrada, al menos 1 m, en la capa de arcilla.

En 1975 se proyecta la prolongación de la canalización del Bernesga desde la confluencia con el Torío hasta el final del Término Municipal de León en dirección aguas abajo (Pérez Alfonso, 1975). La longitud de este tramo es de 1.9 km (Figura 49). Este proyecto representa el último tramo de la canalización en su extremo inferior. El proyecto consiste en la continuación de los muros laterales aguas abajo de la confluencia y que habían sido proyectados en 1968 (ejecutados en 1972). La anchura del cauce entre muros es de unos 120 m. Esta anchura es la que se ejecutó en la canalización de 1968, unos metros aguas abajo de la confluencia del Bernesga con el Torío. La pendiente proyectada del cauce es de 0.0035 m/m, que se corresponde, según el proyecto, con la pendiente media del río entre los extremos del tramo encauzado. El proyecto también prevé la construcción de 12 traviesas separadas unos 160 m (la del extremo superior ya había sido construida en 1972). El trazado de la canalización supone el acortamiento de 3 meandros que suponen la pérdida de unos 790 m de cauce (de una longitud de 2887 m antes de la canalización a 2097 m después de su ejecución). Según consta en el proyecto, la canalización supone la pérdida por parte del río de 70 ha.

El mismo equipo redactor del proyecto de canalización de 1975 redacta una nueva versión en 1977 para adaptarlo a las nuevas exigencias administrativas (Pérez Alfonso, 1977). Según consta en un modificado del proyecto (Pérez Alfonso, 1981), las obras de este proyecto empezaron en

1980. Este último tramo de la canalización en León se terminó en marzo de 1983. El trazado del proyecto es el mismo, pero se reduce su anchura de 120 m a 88 m. Para ajustar la nueva anchura, el muro de la margen izquierda se retranquea hacia el río por medio de una curva de enlace que parte de la alineación del muro de canalización del río Torío. Con la reducción de anchura, la pérdida de superficie de cauce asciende a 76 ha. La profundidad de la excavación de los muros de hormigón es de 2.4 m. Tanto los muros como las traviesas se empotran 1 m en el estrato de arcilla. Es de destacar que según consta en los planos del proyecto, las traviesas (o maestras) se construyen enterradas en el lecho.

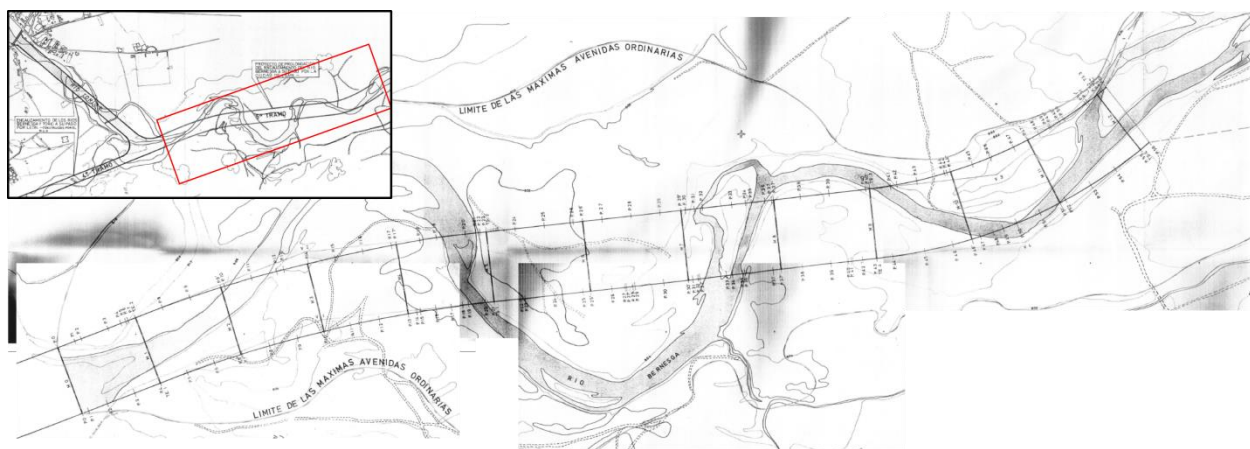


Figura 49. Plano de situación (rectángulo en rojo) y planta del proyecto de prolongación de la canalización del río Bernesga en León (Pérez Alfonso, 1975).

En el año 2000 se redacta el proyecto de adecuación de las márgenes del río Bernesga entre el puente de San Marcos y el puente de San Juan de Dios aguas arriba (en este estudio denominado de Luis Pastrana, Tabla 2) (Peña Espeso, 2009). La distancia por el eje del cauce entre estos dos puentes es de 1.3 km. No se ha conseguido el proyecto con lo que no sabemos qué actuaciones se llevaron a cabo. Las obras finalizaron en 2002. Esta canalización se prolonga hacia aguas arriba en una distancia de 1.5 km desde el puente de Luis Pastrana (Peña Espeso, 2009) hasta prácticamente el límite del T.M. de León. La intervención implica la ejecución de varias escolleras de protección en el cauce, así como la construcción de un muro de escollera para sostener “los taludes verticalizados” (sic). El anejo fotográfico ya indica la existencia de alguna protección de escollera previa al inicio de las obras. Los sondeos realizados cerca de los

estribos de la nueva pasarela proyectada (Pasarela 1, Tabla 2) certifican que la presencia del estrato de arcilla del terciario se ubica a una profundidad de entre 3.3 m y 3.4 m. Hay que hacer notar que los sondeos no se realizaron en el cauce sino en las llanuras de ambas márgenes. El material superior de estas llanuras estaba formado por escombros, seguramente vertidos durante la urbanización de los barrios adyacentes al tramo objeto del proyecto. Pensamos que un proceso similar de relleno y alzamiento de las llanuras de inundación respecto al cauce para facilitar la urbanización pudo haberse llevado a cabo aguas arriba del puente de San Marcos (Figura 46).

10.1 Resumen de las canalizaciones en la Ciudad de León

El tramo del río Bernesga a su paso por León está canalizado en una longitud de unos 8 km. Como se ha visto en el apartado anterior, esta canalización se ha llevado a cabo por fases (Figura 51). La primera fase, finalizada en 1911, abarcó el tramo entre los Puentes de San Marcos y de los Leones (666 m). La segunda fase de la canalización, de 1.2 km de longitud, cubrió el tramo inmediatamente aguas abajo del puente de los Leones hasta el puente de la carretera N-630. Este tramo de la canalización parece que establece las condiciones “canónicas” para las siguientes fases (Tabla 6): tanto la anchura de la canalización de este tramo, definida mediante muros de hormigón (no así la pendiente) como la presencia de traviesas (o maestras, nombre que reciben en los distintos proyectos) se repiten como invariantes en las siguientes fases de la canalización. De este modo, en 1970 finaliza la canalización del tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones (que ya había sido canalizado) con sendos muros en ambas márgenes que suponen un estrechamiento de unos 57 m (de 133 m a 76 m, Tabla 6). La cuarta fase de la canalización consiste en su prolongación hasta la confluencia con el río Torío (1.7 km). Los últimos 2 km del extremo sur de la canalización se terminan en 1983. Sorprenden las condiciones de la canalización en este punto pues el río Bernesga recibe las aportaciones del Torío, un río de una magnitud similar: las superficies de las cuencas del Torío y del Bernesga en la confluencia con el anterior son, respectivamente, de 486 km² y ~1000 km² (esta última superficie no incluye la cuenca del Torío). Es todavía más sorprendente el hecho de que la anchura en el extremo inferior de la

canalización del tramo superior (aguas abajo de la confluencia) era de 120 m. Esta anchura queda reducida a 88 m cuando finalmente se ejecuta el último tramo de la canalización. Es pues entre 1968 y 1983 (15 años) cuando se ejecutan las actuaciones de mayor magnitud (5.6 km). Todas las actuaciones en este tramo (el más urbano del tramo de estudio) implican la construcción de muros de hormigón que impiden la inundación de los terrenos adyacentes. Los muros acaban bruscamente, de una manera inconsecuente (Figura 50).



Figura 50. Fin del muro de la canalización en la margen izquierda. a) vista desde lo alto del muro mirando aguas arriba, b) vista hacia agua arriba del fin del muro desde el suelo: los últimos metros de muro se encuentran tapados por las zarzas del primer plano, c) en la misma zona vista lateral del muro.

Estos muros de hormigón también impiden la toma del sedimento en áreas que antes de la presencia de los muros eran parte activa del cauce (solo la canalización aguas abajo de la confluencia entre el Torío y el Bernesga, la canalización supone una pérdida de 76 ha de cauce). Este hecho significa pues una reducción del suministro de sedimento hacia tramos situados

aguas abajo. Por último, estas obras de canalización, siempre según los datos de los proyectos, supusieron la excavación de 441,000 m³ de sedimento del cauce.

Tabla 6. Variables más significativas de las actuaciones de canalización del río Bernesga. Los volúmenes de excavación consignados en la última columna han aparecido ya anteriormente. En los tramos 5 y 6 no se aplicaron canalizaciones de anchura constante.

número Tramo	límites	fase	coord. aguas arriba (m)	coord. aguas abajo (m)	long. tramo (m)	año finalización obras	anchura cauce (m)	pendiente (m/m)	volumen excavación (m ³)
1	Puente de San Marcos- Puente de los Leones	1	16288	15622	666	1911	133	0.00508	64,000
2	Puente de los Leones- Puente N-630	2	15622	14439	1183	1968	76	-	
1	Puente de San Marcos- Puente de los Leones	3	16288	15622	666	1970	76	0.0048	50,000
3	Puente N-630 - confluencia Torío	4	14439	12734	1705	1973	76	0.004	327,000
4	Confluencia Torío - Travesía 35	5	12734	10681	2053	1983	88	0.0035	
5	Puente Luis Pastrana- Puente de San Marcos	6	17614	16288	1326	2002	-	-	
6	Límite T.M. León- Puente Luis Pastrana	7	18699	17614	1085	2009	-	-	

Las dos últimas actuaciones se encuentran situadas aguas arriba del puente de San Marcos, en el extremo norte de la Ciudad de León. Parecen no ser actuaciones tan invasivas como las llevadas a cabo aguas abajo del puente de San Marcos: no consta la construcción de muros ni de traviesas.

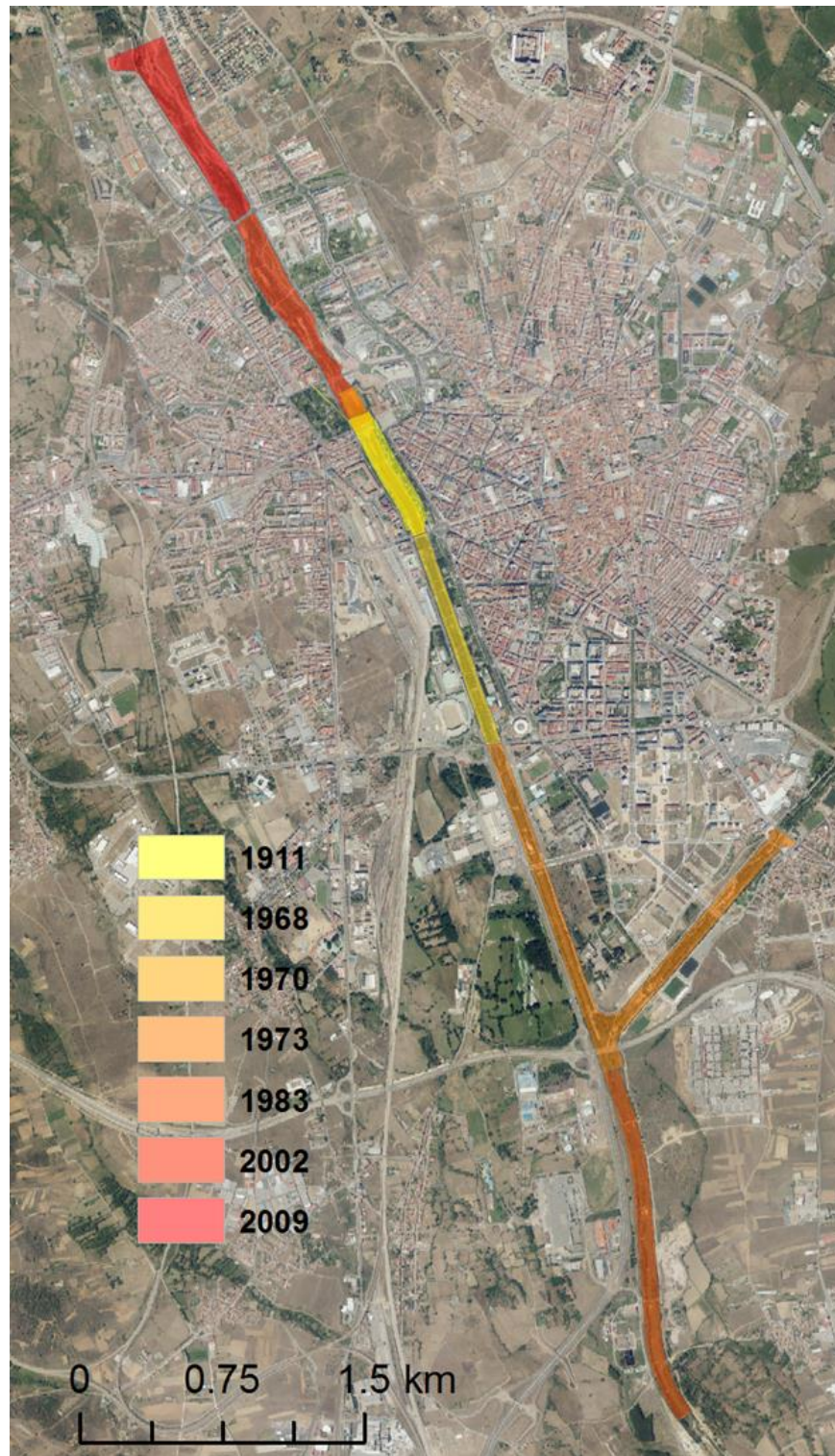


Figura 51. Historia espacial y temporal de las obras de canalización llevadas a cabo en el tramo urbano del Bernesga en la Ciudad de León sobre la ortofoto del PNOA de 2017.

Las obras de canalización del cauce también han supuesto una pérdida de la sinuosidad de la que anteriormente gozaba el río. Para calcular la pérdida de longitud del río a lo largo del tiempo y en las distintas zonas del cauce, se han delineado los ejes por el centro del cauce a partir de las ortofotos de 1956, 1973, 2002 y 2017. Hay que hacer notar que la movilidad lateral del río una vez ha sido canalizado es nula. Se han identificado puntos en cada fotografía que han servido para dividir el tramo de estudio en siete tramos (3 en el tramo urbano de León). Estos puntos corresponden a diversos puentes (San Marcos, N-630) y a la confluencia con el Torío y un vado destruido en 2014 (ver Figura 19) situado 133 m aguas abajo de la última traviesa de la canalización (maestra 12 en Figura 49).

Tabla 7. Evolución temporal de la longitud de los tramos urbanos del Bernesga. Los tramos de la primera columna hacen referencia a los enumerados en la Tabla 6.

tramo	Inicio tramo	Final tramo	Longitud del tramo (m)				Cambio de longitud (m)			
			1956	1977	2002	2017	1956-1977	1977-2002	2002-2017	1956-2017
1-2	San Marcos	N-630	1975	1848	1833	1849	-128	-15	16	-127
3	N-630	Torio	2260	1732	1797	1705	-528	65	-92	-555
4	Torio	Vado	2540	2887	2097	2186	347	-790	89	-354
Total							-309	-740	13	-1036

Los tramos 2 y 3 (aguas arriba de la confluencia con el Torío), canalizados entre 1956 y 1977 (Tabla 6) significaron una reducción de la longitud del cauce del 15% (656 m), Tabla 7. Por el contrario, el tramo aguas abajo de la confluencia aumentó su longitud en 347 m, es decir en un 14%. Este aumento de la longitud se produce por el desarrollo de los meandros, que fueron eliminados en 1983 por las últimas obras de canalización (Figura 49). Esta corta de meandros que supuso la última canalización significa una reducción del 27% de la longitud del cauce en 1977 (790 m), Tabla 7. Como impacto general, las distintas fases de la canalización supusieron reducción de la longitud del cauce de 1 km, es decir un 15% de los 6.8 km que tenía el Bernesga en 1956 desde el puente de San Marcos hasta el vado demolido en 2013 (Figura 19). Esta reducción podría haber sido mayor ya que la primera fase de la canalización finalizó en 1911

(Tabla 6). Sin embargo, la longitud del tramo encauzado en aquel entonces fue relativamente pequeña (de unos 660 m aproximadamente) y la anchura entre muros después de 1911 fue de 133 m, mucho mayor que los 76 m resultantes de la tercera fase de la canalización. Estos dos aspectos nos hacen pensar en que, si hubo una reducción de la longitud del cauce por efecto de la canalización de 1911, no debiera cambiar en exceso la magnitud de las cifras de la Tabla 7. En los resultados de cambio de la longitud del cauce con el tiempo, se aprecia que una vez el río ha sido canalizado mantiene su longitud sin apenas variaciones: los tramos 1 y 2, canalizados en 1968 y 1970 y de 3580 m de longitud, reducen su longitud en solo 15 m entre 1977 y 2002. Pensamos entonces que la posible reducción de la longitud del tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones (tramo 1), de haberse producido, lo más probable es que se hubiera dado en 1911 (por efecto de las obras) y no entre 1911 y 1970, cuando el tramo ya estaba canalizado.

10.2 Otras actuaciones

En 1988 se redacta el proyecto del puente de la calle Riosol (Tabla 2). Para el proyecto se hacen 4 sondeos en las márgenes del cauce. Estos sondeos, indican que existe un material en la superficie formado por escombros (de entre 1 y 2.5 m de profundidad), bajo el cual se sitúa un estrato de grava (cuaternario) en el que se alternan estratos de limo. Este material marca el límite inferior del sedimento cuaternario, cuyo espesor, contando el estrato superior de escombros es de entre 3 a 4.5 m (Geotecnia y Cimientos, 1988).

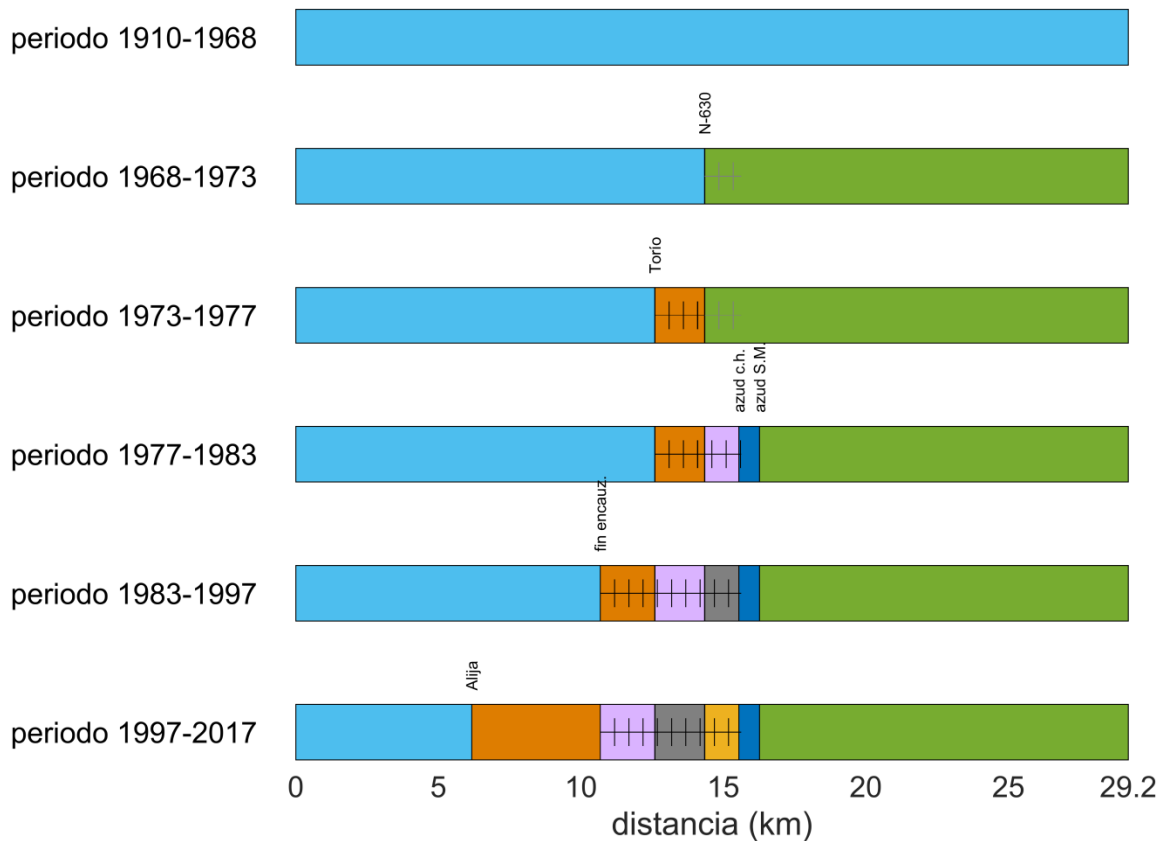


Figura 52. Evolución temporal del número de tramos del Bernesga parcialmente desconectados desde el punto de vista del perfil longitudinal por la presencia de un punto fijo, no erosionable: una maestra o traviesa, un azud o la solera de hormigón de un puente. La coordenada longitudinal representa la distancia desde el Esla. Los distintos colores delimitan por tanto los tramos separados por una estructura transversal de hormigón. La trama de color negro hace referencia a tramos de río con traviesas. La misma trama de color gris indica que no se ha podido certificar la presencia o no de traviesas en el periodo indicado. azud c.h.: hace referencia al azud que en 2004 se convierte en el azud de la central hidroeléctrica.

10.3 División del perfil longitudinal en tramos

Es importante conocer las fechas y la posición que ocupan en el perfil longitudinal aquellos puntos cuya cota permanece fija, lo que sucede cuando se construyen obras transversales

como maestras (traviesas), azudes o soleras de hormigón bajo puentes. La construcción de estas obras transversales supone que los tramos contiguos, el de aguas arriba y el de aguas abajo, se comporten de forma independiente uno de otro, desde el punto de vista de la evolución del perfil longitudinal: se puede decir que quedan desconectados. En condiciones normales, es decir, en ausencia de puntos de fijos, la cota del fondo del cauce en un tramo depende de la diferencia entre el suministro de material sólido desde aguas arriba y el transporte de material de fondo desde el tramo hacia aguas abajo. Cuando esta diferencia es positiva, es decir cuando entra más sedimento que el que se transporta hacia aguas abajo, el lecho sufre un crecimiento. A la inversa sucede si el suministro es menor que el transporte: entonces el lecho se incide (se erosiona). Obviamente, estos razonamientos no se cumplen cuando el fondo no es aluvial sino de hormigón, pues no se puede erosionar. La presencia del fondo fijo en una sección impone pues una discontinuidad en el perfil. Así, la cota del lecho en el tramo aguas arriba de la obra transversal está controlada por la cota del punto fijo que, por definición, no puede cambiar. Así pues, es importante notar que el perfil del tramo superior no depende de la cota del fondo del tramo inferior, pues entre ambos tramos se sitúa el punto con cota invariable que es quien de hecho ejerce el control sobre la evolución del perfil del tramo aguas arriba. En cambio, el perfil longitudinal del tramo situado aguas abajo de la obra transversal, expresión de las cotas del tálveg, solo está controlado por la cota del lecho de su extremo inferior, que puede ser a su vez una obra de fábrica o bien la desembocadura del río a otro mayor (como en el caso del Esla) o al mar. Insistimos en que el perfil longitudinal aguas abajo del punto fijo no depende de la cota de este último punto, solo del suministro de material que le llega del tramo superior y de la cota en su extremo inferior.

La Figura 52 muestra cuál ha sido la evolución del número de tramos morfológicamente desconectados en el Bernesga. No es hasta 1973 cuando aparece la primera estructura transversal cerca del puente de la N-630 (unos 370 m aguas arriba). Se trata del final de la segunda fase de canalización del Bernesga (Tabla 6). No se sabe si en aquella fecha ya se habían construido las traviesas del tramo canalizado (hasta el puente de los Leones hacia aguas arriba) aunque en la prolongación de la canalización hasta la confluencia con el Torío ya aparecen en el

plano. La traviesa situada 370 m aguas arriba del puente de la N-630 es la última del tramo canalizado, la que controla el perfil del tramo superior y lo desconecta del tramo inferior.

En 1973 y 1977 se ejecutan las canalizaciones de los tramos contiguos que suponen la construcción de nuevas traviesas: en 1973 se extiende la canalización, incluyendo traviesas, hasta la confluencia con el Torío, mientras que es en 1977 cuando se ven por primera vez en fotografía aérea los azudes de San Marcos (Figura 12) y el situado aguas abajo del puente de los Leones, futura central hidroeléctrica (Figura 4). Estas dos últimas barreras fueron proyectadas en 1964 y 1968, respectivamente. No se sabe si fueron terminadas en la misma fecha (1970, Tabla 6) que la segunda canalización del tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones o posteriormente.

La siguiente fase de la canalización, su prolongación hacia aguas abajo hasta el límite del T.M. de León, termina en 1983 con otra traviesa que separa la evolución del tramo inferior del superior en la Ciudad de León. Este tramo, igual que los situados aguas arriba, incluye la construcción de traviesas intermedias. Finalmente, no es hasta 1997 que se ejecuta la solera de hormigón para proteger la cimentación del puente de Alija. Entre 1977 y 2002 (no se sabe la fecha), se construye un vado unos 133 m aguas abajo del final de la canalización de 1983 (Figura 19), demolido en 2015. Como no consta en los planos del proyecto de canalización, pensamos que es posterior a 1983. Se ha omitido su representación en la Figura 52 dada la poca distancia a la última traviesa de la canalización.

Desde 1997 existen pues tres grandes tramos: 1) desembocadura-puente de Alija, 2) puente de Alija-final de la canalización (o vado) y 3) aguas arriba del azud de San Marcos. A estos, habría que sumar los 4 tramos urbanos controlados por traviesas. La extrema fragmentación del río Bernesga es expresión de su deterioro por culpa de la incisión. Al mismo tiempo, los puntos fijos crean su propia dinámica de incisión.

10.4 Extracciones de material aluvial

Entre la información que se ha podido recopilar están las concesiones de extracción de material aluvial desde 1987. Los datos, procedentes de los archivos de la CHD, recogen el año de la

concesión, el volumen de material oficialmente extraído y el término municipal donde se realiza la extracción. No se ha localizado la información de las extracciones anteriores a 1987, pese a que se sabe que se contabilizaron del mismo modo, extracciones que fueron, con toda probabilidad, más intensas que después de 1987. La localización de estas extracciones, con más precisión que simplemente el término municipal, se ha hecho en base a las zonas adyacentes al Bernesga donde se aprecia actividad extractiva en la ortofoto de 2002. Estas zonas son visibles en foto aérea por la evidencia de movimientos de tierra, acopios de material, balsas de lavado de sedimento y brazos de río aislados y que no conservan su geometría fluvial (anchuras, radios de curvatura, etc.). Se ha tomado la ortofoto de 2002 porque es la más próxima en el tiempo a la época de la que se tienen datos de extracciones. En ella se han localizado, a lo largo de todo el tramo de estudio, seis zonas de extracción. En la imagen se distingue que es aguas abajo de la confluencia con el Torío donde hay un mayor número de extracciones (Figura 53): el área ocupada por las 4 primeras extracciones aguas arriba de la confluencia con el Esla asciende a 55.6 ha mientras que las 2 zonas de extracción más cercanas al extremo superior del tramo de estudio suman 14.8 ha (Figura 53 y Tabla 8). El área total afectada por extracciones en 2002 es 70.4 ha.

Se ha repetido la misma tarea con las ortofotos anteriores: 1956 y 1977. En 1956 no se aprecia ninguna zona activa de extracciones. Esto no significa necesariamente que en esa época no se extrajera material del cauce. Pensamos más bien que la ausencia de zonas activas (visibles) podría estar indicando que la extracción de sedimento se llevaba a cabo mediante métodos tradicionales, con poca o ninguna tecnificación, lo que a su vez llevaba, seguramente, a que su impacto en la morfología del río fuera escaso. No ocurre lo mismo en la fotografía de 1977, en la que se observa una gran actividad de extracciones, principalmente aguas abajo de la ciudad de León (Figura 53). El tramo bajo del Bernesga (después de la confluencia con el Torío) aún conserva parte (menor) de la morfología trenzada de la ortofoto de 1956. Es en estas zonas amplias, con abundancia de material aluvial en la imagen de 1977, donde son claramente visibles los movimientos de tierra. En este tramo, las zonas afectadas por extracciones son mayores que en 2002: se ha estimado que el área afectada por las extracciones en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Torío es 139 ha, aproximadamente el doble que en 2002.

Pensamos que la gran actividad extractiva visible en 1977 va ligada a la expansión urbanística de la ciudad de León durante las décadas de 1950-70. Esta expansión fue la que en gran medida impulsó las distintas fases de la canalización del Bernesga.

Las extracciones documentadas por la CHD (posteriores a 1987) se han asignado a las distintas zonas localizadas en la ortofoto de 2002 (Figura 54). Destaca el hecho de que es en el Municipio de Villaturiel (Figura 1) donde, según los datos de CHD, se ha concentrado la actividad extractiva y es también éste el municipio que, conforme a los resultados de la ortofoto de 2002, reúne la mayor superficie con extracciones (55.6 ha, Tabla 8). La intersección de los límites de cada una de las 6 zonas de extracción con el eje del río ha servido para ubicar las zonas de extracción en el perfil longitudinal (Figura 54). En el listado oficial de extracciones consta una concesión al Ayuntamiento de León en el año 1992 para extraer de 7,755 m³ en el tramo del Bernesga a su paso por la ciudad. Este dato no se ha asignado a ningún tramo de río al no haberse podido identificar ninguna zona activa de extracciones en la ortofoto de 2002 en la Ciudad de León. Las extracciones que según el listado de la CHD se llevaron a cabo en el T.M. de Vega de Infanzones (situado en la margen derecha del río aguas abajo de León, Figura 1) y que suman 18,423 m³ se han asignado a las áreas localizadas en Villaturiel, población situada en la margen izquierda, marcando el Bernesga el límite entre los dos municipios. Por último, los 50,000 m³ de material extraído en 1990 en el T.M. de Cuadros se han asignado a las dos áreas de extracción más cercanas en Sariegos (extrac- 8 y 9, Tabla 8), aguas arriba de la Ciudad de León.

Además de las concesiones de extracción de la CHD, se han podido documentar ya (ver Tabla 6) las excavaciones del cauce vinculadas a los proyectos de canalización del río de 1908, 1964 y 1968, finalizados en 1911, 1970 y 1973 respectivamente, todas en León y que ahora se llaman extracciones 5-7 (Tabla 8). Las dos primeras afectan al tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones mientras que la última (la más voluminosa) corresponde al tramo entre el puente de la carretera N-630 y la confluencia con el Torío (Tabla 6). Los volúmenes de extracción que constan en el proyecto se han dividido a partes iguales entre los años que van desde la redacción del proyecto a la finalización de las obras. Estas obras de canalización duraron entre 4

y 7 años. Es por ello por lo que consideramos que tienen los mismos efectos sobre el río que las extracciones propiamente dichas.

La Tabla 8 por tanto reúne dos tipos de datos. Por un lado, datos de volúmenes de excavación en obras de canalización documentadas, todas anteriores a 1974, datos agregados que se desagregan ahora por años. Por otro lado, datos de concesiones de extracción por años, todos posteriores a 1987 (porque los anteriores no se han podido localizar) y hasta 2004, que son datos desagregados por municipios y que aquí se desagregan aún más en zonas de extracción.

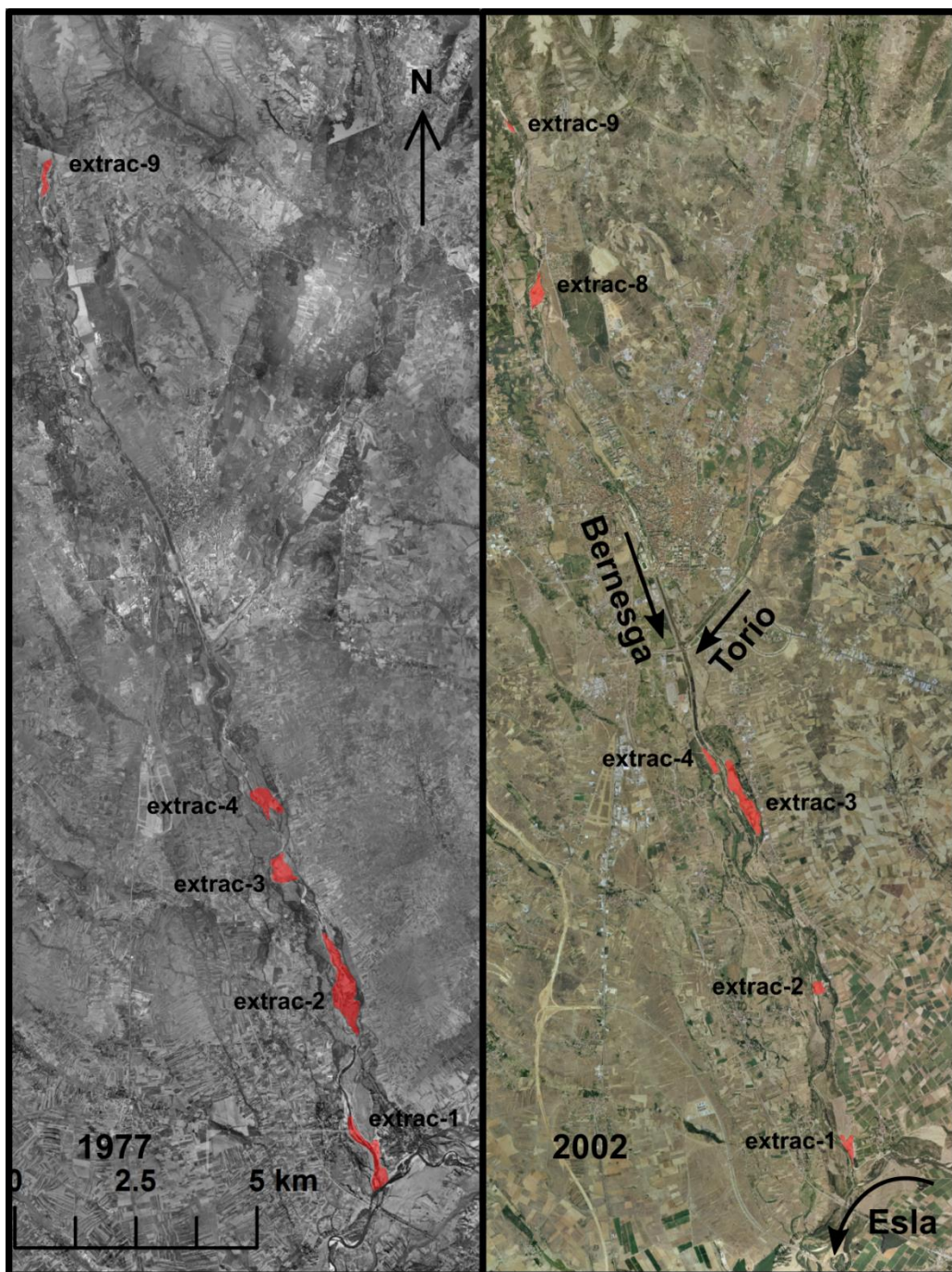


Figura 53. Zonas de extracción de material aluvial en los años 1977 y 2002. La denominación extrac-1 a -4 y extrac-8 y 9 se usa en la cuantificación (Tabla 8).

Tabla 8. Datos de las extracciones de material aluvial. Las áreas corresponden a las superficies (en ha) afectadas por extracciones. La longitud L indica el tramo de río afectado por las extracciones. Para la localización de Extrac-1...-4 y 8-9 ver Figura 53. Las zonas 5-6-7 son en León según la extensión de las canalizaciones (ver Tabla 6).

	Extrac-1	Extrac-2	Extrac-3	Extrac-4	Extrac-5	Extrac-6	Extrac-7	Extrac-8	Extrac-9
T.M.	Villaturiel				León			Sariegos	
área (ha)	8.4	5.9	34.5	6.7	16.7	9.5	7.6	12.9	1.9
L (m)	553	229	1696	651	1914	725	878	1013	339

Volumen de material aluvial extraído (m ³ /año)										
año	Extrac-1	Extrac-2	Extrac-3	Extrac-4	Extrac-5	Extrac-6	Extrac-7	Extrac-8	Extrac-9	Total
1908	0	0	0	0	0	16,000	0	0	0	16,000
1909	0	0	0	0	0	16,000	0	0	0	16,000
1910	0	0	0	0	0	16,000	0	0	0	16,000
1911	0	0	0	0	0	16,000	0	0	0	16,000
1964	0	0	0	0	0	0	7,143	0	0	7,143
1965	0	0	0	0	0	0	7,143	0	0	7,143
1966	0	0	0	0	0	0	7,143	0	0	7,143
1967	0	0	0	0	0	0	7,143	0	0	7,143
1968	0	0	0	0	54,500	0	7,143	0	0	61,643
1969	0	0	0	0	54,500	0	7,143	0	0	61,643
1970	0	0	0	0	54,500	0	7,143	0	0	61,643
1971	0	0	0	0	54,500	0	0	0	0	54,500
1972	0	0	0	0	54,500	0	0	0	0	54,500
1973	0	0	0	0	54,500	0	0	0	0	54,500
1987	6,416	2,653	19,675	7,556	0	0	0	0	0	36,300
1988	2,220	918	6,808	2,615	0	0	0	0	0	12,561
1989	6,931	2,866	21,255	8,163	0	0	0	337	113	39,665

Continúa en la página siguiente.

Tabla 8. Continuación...

	Extrac-1	Extrac-2	Extrac-3	Extrac-4	Extrac-5	Extrac-6	Extrac-7	Extrac-8	Extrac-9
T.M.	Villaturiel				León			Sariegos	
área (ha)	8.4	5.9	34.5	6.7	16.7	9.5	7.6	12.9	1.9
L (m)	553	229	1696	651	1914	725	878	1013	339

Volumen de material aluvial extraído (m ³ /año)										
año	Extrac-1	Extrac-2	Extrac-3	Extrac-4	Extrac-5	Extrac-6	Extrac-7	Extrac-8	Extrac-9	Total
1990	12,987	5,370	39,827	15,295	0	0	0	37,480	12,520	123,478
1991	3,838	1,587	11,769	4,520	0	0	0	13,436	4,489	39,639
1992	60,098	24,850	184,304	70,779	0	0	0	13,493	4,507	358,032
1997	4,004	1,656	12,281	4,716	0	0	0	0	0	22,657
1998	1,810	748	5,550	2,131	0	0	0	0	0	10,239
1999	1,927	797	5,908	2,269	0	0	0	0	0	10,900
2004	3,358	1,389	10,298	3,955	0	0	0	0	0	19,000
Total	103,588	42,833	317,676	121,999	327,000	64,000	50,000	64,746	21,629	1,113,471

El volumen total de material extraído que se ha podido cuantificar y localizar asciende a algo más de 1.1 millones de m³ (Tabla 8). De estos, 672,000 m³ corresponden a las extracciones concedidas desde 1987 y que constan en los archivos de la CHD. Los volúmenes de excavación correspondientes a los proyectos de canalización suman 441,000 m³ (de los que 327,000 m³ corresponden al tramo entre la N-630 y la confluencia con el Torío).

Un 51% del volumen total de material extraído lo fue del tramo aguas abajo de la confluencia con el Torío (columnas Extrac-1...4). Este tramo tiene una longitud de 12.7 km. Este volumen (568,000 m³) corresponde íntegramente a las extracciones posteriores a 1987. Pensamos que el volumen de material realmente extraído pudo haber sido mucho mayor que el registrado en las anotaciones de la CHD. En primer lugar, porque a esta cantidad habría que añadir los volúmenes de material extraídos antes de 1987. Pensamos que es precisamente entre las décadas de 1960 y 1970 cuando la intensidad de las extracciones fue mayor. Esta intensidad, como se ha dicho, la vemos vinculada al crecimiento urbanístico de la Ciudad de León durante esos años. Por otro lado, y como ocurre habitualmente, no hay constancia del volumen final extraído en cada concesión. Normalmente, el volumen realmente extraído excede el volumen de material concedido. Es por todo lo anterior por lo que pensamos que la cifra de 1.1 millones de m³ debería de ser tomada como un mínimo del volumen de material extraído en el Bernesga.

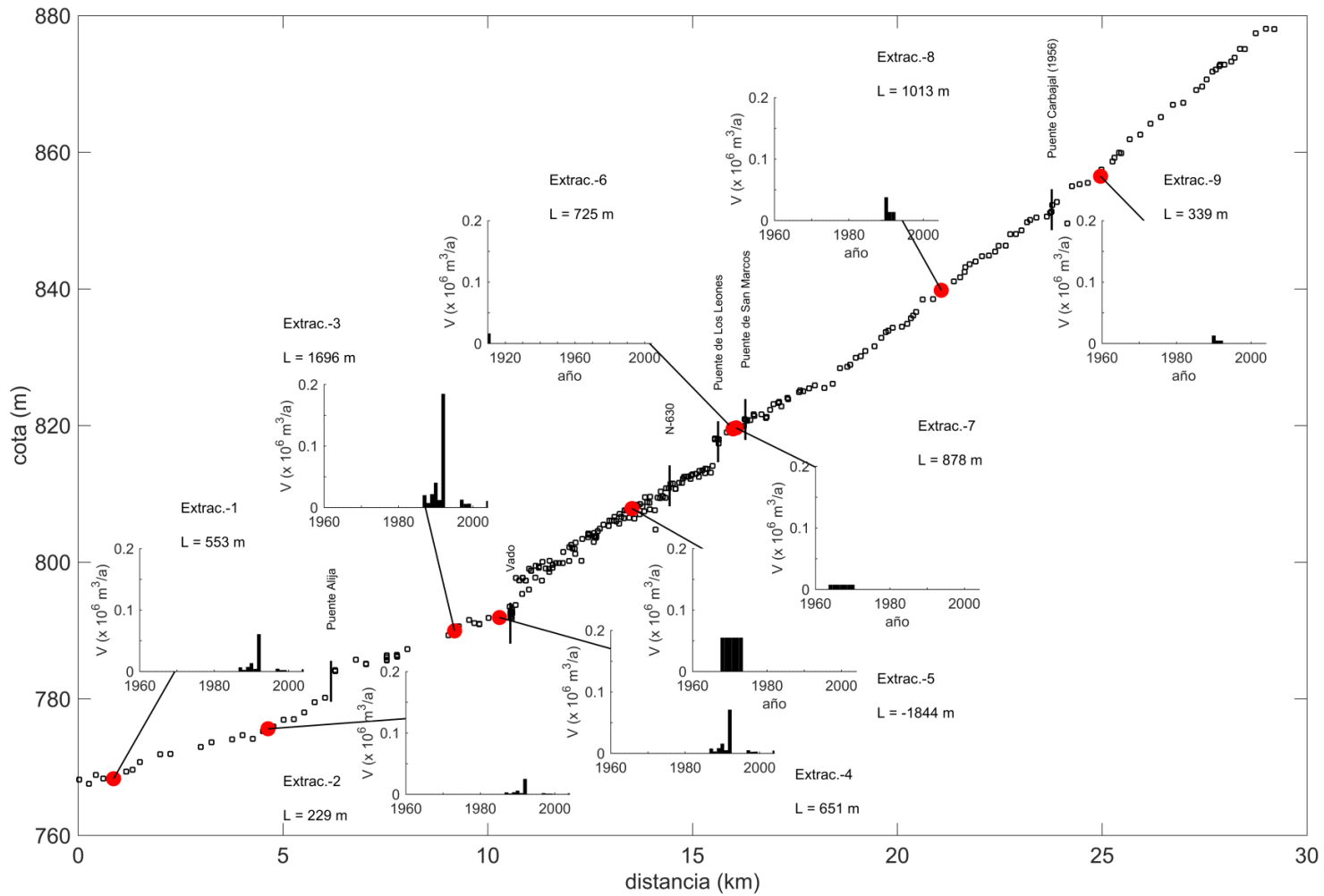


Figura 54. Volúmenes de material aluvial extraído (en millones de $\text{m}^3/\text{año}$). Los puntos rojos sobre el perfil longitudinal indican el centro de gravedad de cada área de extracción. El perfil longitudinal sobre el que se documentan los volúmenes de material extraído es el de 2017.

11 CARACTERIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS ALUVIALES A LO LARGO DEL TIEMPO

El objetivo de esta parte del trabajo es la digitalización de la naturaleza del suelo (“uso”) en la franja directamente relacionada con la dinámica fluvial del tramo del Bernesga objeto de análisis. Con ello se pretende obtener las evidencias en planta de los cambios en la dinámica fluvial, que será mejor conocida y analizada en los perfiles longitudinales por el tálweg de los apartados siguientes, en los que se concentra el análisis. Recordemos que la incisión irá normalmente acompañada de una reducción de anchura aluvial activa.

11.1 Metodología

Se han tomado varias fotografías aéreas para tener datos del mayor periodo posible y lo mejor distribuidos temporalmente que resulte posible. A la vista de las fotografías aéreas disponibles se seleccionaron las siguientes:

1. Fotografía del vuelo americano de 1956. Facilitada por la Confederación Hidrográfica del Duero, ya georreferenciada. En blanco y negro.
2. Fotografía del vuelo interministerial de 1977, Disponible y georreferenciada en los visores online del Instituto Geográfico Nacional. También en blanco y negro.
3. Fotografía del Vuelo SIGPAC del año 2002. Disponible y georreferenciada en los visores online del Instituto Geográfico Nacional. Formato a color.
4. Fotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2008. Disponible y georreferenciada en los visores online del Instituto Geográfico Nacional. Formato a color.
5. Fotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2017, muy reciente. Disponible georreferenciada en los visores online del Instituto Geográfico Nacional. Formato a color.

La foto de 2017 está disponible en el siguiente visor: <http://www.ign.es/wms-inspire/pnoa-ma?SERVICE=WMS&>

Con ello, y teniendo en cuenta que la disponibilidad de fotografías es mayor cuanto más nos acercamos a fechas actuales, de tal forma que con el PNOA prácticamente hay una fotografía aérea al año, se consigue una buena cadencia de análisis.

La fotografía de 1956 ofrece un punto de partida en que el río presenta unas características diametralmente opuestas a las actuales. Se trata de un estado anterior a los mayores impactos, sin presiones sobre el río y sus zonas cercanas.

La fotografía del año 1977 ya muestra cambios bastante sensibles, pese a que se siguen manteniendo unos usos muy diferentes a los actuales, pero aparecen afecciones directas, especialmente con la ocupación del espacio fluvial por extracciones de áridos y plantaciones de chopos. Los principales impactos se dan en las zonas cercanas al río.

La imagen del SIGPAC de 2002 es la primera en que la simplificación del sistema fluvial se hace más patente, quedando el cauce menor muy fijado, estabilizado, y con escasos cambios. Los impactos sobre las zonas cercanas al cauce son muy elevados y la pérdida de diversidad desde 1977-1983 es muy sensible.

Las fotografías del PNOA de 2008 y 2017 inciden en la pérdida de dinamismo y la reducción máxima de las zonas ligadas al sistema fluvial y su dinámica. Las zonas directamente relacionadas con la dinámica fluvial quedan reducidas a la mínima expresión.

En cada uno de los años se han digitalizado mediante el Sistema de Información Geográfica ARC-GIS de ESRI, los siguientes tipos de naturaleza (“usos”) del suelo:

Lámina de agua: Superficie visiblemente ocupada por el agua en el momento de toma de la fotografía aérea. Incluye, además del cauce menor funcional, aquellos brazos desgajados de la corriente principal pero ocupados por el agua y que son especialmente relevantes en los primeros años del análisis (Figura 55).

Barras fluviales: Superficies ocupadas por gravas y material aluvial generalmente de tamaño pequeño y con escasa colonización vegetal. Suponen las zonas más dinámicas junto con la categoría anterior. La vegetación no ha sido capaz de arraigar sensiblemente debido al grado de

dinamismo que presentan, lo que permite cambios importantes según la frecuencia e intensidad de las avenidas (Figura 56).

Primicolonizadoras: Superficies de transición entre zonas de bosque de ribera y las barras fluviales. Suelen estar formadas por vegetación hidrófila de porte arbustivo, como los sauces, o bien por herbáceas. La dinámica fluvial limita su consolidación al remover los sedimentos sobre los que se asientan, siendo frecuentes cambios importantes en eventos de crecida (Figura 57).



Figura 55. Fotografía que ejemplifica la lámina de agua cartografiada. Imagen correspondiente al tramo entre las coordenadas longitudinales 20 km y 23 km, aguas abajo del puente de Carbajal de la Legua.



Figura 56. Fotografía que ejemplifica la superficie del cauce cubierta por barras aluviales. La imagen corresponde al extremo superior del depósito aluvial aguas arriba del puente de San Marcos.



Figura 57. Ejemplo de una superficie cubierta por vegetación primicolonizadora. Fotografía del tramo del Bernesga entre traviesas aguas abajo de la confluencia con el Torío.

La digitalización se ha realizado a una escala en pantalla de 1:3.000, siendo más que suficiente para la identificación de las superficies mínimas de cada uno de los usos del suelo descritos.

La variación de la superficie de cada uno de estos usos, así como las proporciones que suponen en relación con las otras, ofrecen información sobre el funcionamiento del río y sus cambios a lo largo del tiempo, siendo tanto indicadores de cambios como reflejos de los mismos.

11.2 Resultados

Una vez finalizada la digitalización de las tres categorías para cada uno de los 5 años objeto de análisis, se pueden extraer los siguientes resultados, de menor a mayor detalle.

Visión global. Superficie ocupada por los tres usos del suelo en cada año.

Se tiene en cuenta la suma de superficie que totalizan las tres categorías, lámina de agua, barras y primicolonizadoras, en cada año de estudio. De este modo se tiene una visión global de la importancia y extensión del medio aluvial en cada momento de análisis.

Tabla 9. Resultados de la evolución temporal de la superficie total de cauce: barras + lámina de agua + primicolonizadoras.

Uso/año	1956	1977	2002	2008	2017
Total (ha)	1,966	1,011	428	237	201
ha cambio/año		-45.5	-23.3	-31.8	-4.0

Los resultados muestran cómo la superficie más relacionada con la dinámica fluvial, la lámina de agua, las barras móviles y las zonas escasamente colonizadas, ha ido descendiendo sin cesar durante todo el periodo de estudio. En cifras globales han pasado de ocupar un total de 1,966 hectáreas en el año 1956 a 201 hectáreas en 2017 (Tabla 9).

Sin embargo, la velocidad relativa de los cambios ha sufrido variaciones a lo largo del periodo de estudio si tenemos en cuenta que la distancia anual entre fotos es diferente. De este modo se aprecia que los cambios fueron especialmente importantes entre 1956 y 1977, cuando se redujeron el conjunto de estos usos en casi 1.000 ha, a un ritmo relativo de 45.5 ha/año. Por el contrario, el último periodo analizado, entre 2008 y 2017 la pérdida tiene un ritmo de unas 3 ha/año, siendo con diferencia la menor tasa de pérdida de espacio fluvial de todo el periodo de análisis, lo que demuestra una clara estabilización de la dinámica fluvial, como herencia de las canalizaciones que fijan y constriñen el espacio fluvial.

Visión por categorías

Los cambios en las cifras globales se desagregan en los cambios sucedidos en las diferentes categorías de suelo analizadas: lámina de agua, barras y primicolonizadoras. Los resultados son los siguientes.

Tabla 10. Resultados de la evolución temporal de la superficie ocupada por lámina de agua.

Uso/año	1956	1977	2002	2008	2017
----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Lámina agua (ha)	285	214	150	144	120
ha cambio/año	-	-3.4	-2.6	-1.0	-2.7

La superficie de lámina de agua ha sufrido un retroceso constante durante los años de análisis. Ha pasado de ocupar casi 285 ha en el año 1956, a poco más de 120 ha en 2017. La mayor tasa de pérdida de superficie en relación con los años se da entre 1956 y 1977. En 2017, respecto a 2008 se da una aceleración en la pérdida, posiblemente en relación con el incremento de los procesos incisivos. Hay que señalar que, al igual que sucede con las otras categorías, la lámina de agua, aún en mayor medida por su magnitud pequeña, puede variar de forma relativa si la fotografía aérea se realiza en aguas altas, medias o bajas. Aun así, la tendencia general parece indicar inequívocamente que la pérdida de superficie de agua no está relacionada con estas circunstancias.

Debemos concluir que el área que ocupan las aguas permanentes se ha reducido. Esto se puede relacionar con el acortamiento o pérdida de longitud del curso (resumido en la Tabla 7), que sin embargo es bastante menos intenso que la pérdida de lámina de agua (Tabla 11). Al ser así, se puede deducir que las secciones transversales del Bernesga se han hecho más estrechas y profundas con el avance de la incisión. Esto fue ya señalado a propósito de la incisión del cauce en roca. La relación entre anchura e incisión será analizada cuantitativamente en §13.

Tabla 11. Resultados de la evolución temporal de la superficie ocupada por las barras.

Uso/año	1956	1977	2002	2008	2017
barras (ha)	1269	132	50	29	24
ha cambio/año	-	-54.1	-3.3	-3.6	-0.5

La superficie de barras se ha reducido de una forma muy importante entre 1956 y 2017. De hecho, apenas quedan el 2% de las barras que había en 1956 (Tabla 11). El mayor cambio se da entre 1956 y 1977 cuando se pierden más de 1100 ha de las 1269 ha que había. El ritmo de cambio en esos 20 años es de casi 54 ha/año. Esta tendencia se reduce en gran medida en los siguientes años, siendo ahora muy reducido, habida cuenta de la ya muy escasa superficie de barras existentes.

Tabla 12. Resultados de la evolución temporal de la superficie ocupada por primicolonizadoras.

Uso/año	1956	1977	2002	2008	2017
Primicolonizadoras (ha)	412	664	227	64	57
ha cambio/año	-	12	-17.5	-27.2	-0.8

Por último, las coberturas de primicolonizadoras muestran una evolución diferente, al tener un repunte en la fotografía de 1977, seguido por un claro descenso en el resto, siendo hoy sólo el 8.6% de lo que alcanzaron a ocupar en 1977 (Tabla 12). Parece lógico pensar que buena parte de la disminución de la superficie de barras que se dio entre 1956 y 1977 pasó a engrosar la categoría de primicolonizadoras que, en años posteriores, fueron ya ocupadas por usos del suelo menos relacionados con la dinámica fluvial, como cultivos herbáceos o, en buena medida, cultivos de chopos, muy abundantes en varios sectores de la zona de estudio. La disminución de las zonas de primicolonizadoras es muy importante entre 1977 y 2002, con tasas de pérdida de 17.5 ha/año, y se incrementa entre 2002 y 2008, perdiendo unas 27 ha/año, principalmente al desconectarse de la dinámica fluvial zonas cercanas al cauce fruto de la incisión del mismo.

La visión conjunta de los datos mostrados con anterioridad nos deja entrever una dinámica decreciente, con una pérdida de las categorías fluviales. La categoría que menos superficie ha perdido, tanto en términos relativos como absolutos, (queda poco más del 58% de lo que había en 1956, lo que supone unas 164 ha menos) es la lámina de agua. El trazado del cauce menor, aquel cubierto de forma más o menos permanente por agua durante todo el año, ha sufrido grandes cambios, pasando de tener muchos tramos de cauce divagante con trenzamiento a ser un único cauce con índice de sinuosidad mucho menor, tornándose en rectilíneo o poco sinuoso en la mayor parte de la zona de estudio.

Este cauce que en 1956 presenta una longitud que supera en 4.1 km a la actual (tomando el eje de uno de los brazos del río en la fotografía aérea de 1956) lo que muestra el grado de simplificación del trazado que se ha dado en poco más de medio siglo.

Los últimos años no han supuesto grandes cambios en la morfología del cauce, si bien el proceso de incisión, muy importante tanto aguas arriba como aguas abajo de la Ciudad de León, supone la desconexión de zonas antiguamente fluviales, en un principio de barras y posteriormente primicolonizadoras, de cualquier dinámica fluvial.

En este sentido, del trabajo de fotointerpretación cabe mencionar que en la fotografía de 1977 se aprecia un importante número de explotaciones de áridos y plantaciones de chopos distribuidas tanto aguas arriba como, sobre todo, aguas abajo de León.

Buena parte de las explotaciones de áridos que funcionaban en el año 1977 no funcionan hoy, o bien buena parte de la superficie alterada en la ortofotografía de 1977 tiene hoy otros usos, como parcialmente revegetadas y plantaciones. Sin embargo, la superficie de plantaciones de 1977 continúa con el mismo uso en la actualidad, habiéndose unido nuevas superficies de este tipo de cultivos de ribera. La mayor parte de las plantaciones que se observan en el año 1977 ocupan superficies que en 1956 eran barras aluviales. Del mismo modo, las extracciones de áridos y plantas para su tratamiento también se nutrían de estas zonas de barras, deteriorando su calidad y suponiendo su total alteración hasta quedar fuera de la categoría.

La conclusión del análisis es que la superficie fluvial, ya fuese de barras, primicolonizadoras o lámina de agua se ha visto muy reducida en la segunda mitad del pasado siglo, especialmente debido a la presencia de extracciones de áridos y, muy especialmente, a usos del suelo diferentes, más estables y alejados del dinamismo de un sistema fluvial. En especial, hay superficies muy extensas de plantaciones de chopos que, con la incisión de los últimos años podrían empezar a quedar descolgadas de los niveles freáticos, y, en menor medida, también hay zonas ocupadas por la implantación de cultivos, generalmente herbáceos, así como algunas urbanizaciones, especialmente en el entorno de León capital.

Como resultado de todo esto, se ha producido una disminución muy apreciable del espacio fluvial que ha llevado consigo una pérdida de diversidad en las morfologías del río, pasando de tener un trazado sinuoso, con zonas trenzadas sobre amplias áreas de barras, a quedar reducido a un cauce único, muy poco sinuoso y con la desaparición de la gran mayoría de las barras, agravado por los sensibles procesos de incisión.

12 ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL BERNESGA

En este apartado se buscan los cambios significativos en los usos del suelo en la cuenca (ya no en el cauce), porque estos cambios pueden ser causa de incisión. Para ello, se han tomado las coberturas periódicas que proporciona Corine Land Cover (CLC), concretamente las de los años 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018 (desgraciadamente no hay fechas más antiguas). Se han agrupado los datos por subgrupos para hacer más sencillo su análisis, distinguiendo las coberturas más antropizadas (zonas urbanas, principales vías de comunicación, zonas de vertido, zonas extractivas, etc.), las zonas de cultivos (regadíos, secanos, frutales, zonas de mosaico agroforestal o pastos, entre otras), las zonas de vegetación natural (bosques de frondosas, mixtos, coníferas, matorrales o zonas de roquedos, etc.), zonas afectadas por incendios y láminas de agua de extensión importante. Los resultados son los siguientes:

Las zonas más antropizadas, con mayores afecciones y usos del suelo más alejados de la naturalidad, generalmente muy impermeabilizadas, han ganado extensión de forma continuada en cada una de las cartografías realizadas. Prácticamente han doblado su superficie desde 1990 hasta 2018, pasando de suponer poco más de 4,300 ha en 1990 a unas 8,000 ha en el año 2018 (Tabla 13). Sin embargo, hay que reseñar que aún con este ascenso tan significativo, siguen siendo zonas poco representativas en el contexto de la cuenca, no llegando a suponer ni un 7% del total de la superficie.

En un análisis más detallado se puede apreciar cómo los principales ascensos se dan en la categoría de tejido urbano discontinuo, zonas industriales y comerciales, zonas verdes urbanas y zonas de instalaciones deportivas. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que, pese a que las categorías y su codificación se mantienen, puede haber ligeros cambios en el criterio de asignación que, como sucede en el caso de los datos analizados, impliquen algunas cifras incoherentes, como es el caso de la reducción de las zonas de tejido urbano continuo.

Tabla 13. Evolución temporal de la superficie (en ha) de los distintos usos del suelo considerados por el Corine Land Cover.

Código	Categorías	1990	2000	2006	2012	2018
		Superficie (ha)				
111	Tejido urbano continuo	799	799	803	763	730
112	Tejido urbano discontinuo	281	1053	1628	2072	2691
121	Zonas industriales y comerciales	139	352	316	1204	1200
122	Carreteras y tren	49	49	152	76	114
124	Aeropuertos	0	0	0	0	22
131	Zonas extracción minera	768	1134	1078	747	834
132	Escombreras y vertederos	97	177	177	10	11
133	Zonas en construcción	200	0	180	148	31
141	Zonas verdes urbanas	0	0	0	182	185
142	Instalaciones deportivas	0	0	0	227	177
URBANO		4323	5564	6340	7441	8013
211	Cultivos de secano	5379	4868	4972	2668	2576
212	Cultivos de regadío	1433	1476	1477	3218	2528
222	Frutales	41	41	41	44	0
231	Prados y praderas	2940	2940	2887	9346	8985
242	Mosaico de cultivos agrícola con vegetación natural	5773	5328	5133	46	1170
243		7997	7703	7309	3105	3097
244	Mosaico agro-forestal	327	327	320	237	237
AGRÍCOLA		23890	22683	22139	18664	18593
311	Bosques de frondosas	20166	22541	22620	24875	24734
312	Bosques de coníferas	6248	6194	6564	6687	6709
313	Bosques mixtos	2428	8563	8473	794	794
321	Pastizales naturales	14829	13245	13184	8177	9013
322	Matorrales húmedos (mesófilos)	15587	15392	15375	39962	34578
323	Matorrales esclerófilos	6885	5140	5020	1162	3520
324	Matorral boscoso de transición	12074	6770	6852	5032	6880
332	Roquedos	5260	5260	5157	501	567
333	Espacios con escasa vegetación	5997	5950	5885	4040	3990
FORESTAL		89474	89055	89130	91230	90785
334	INCENDIOS	0	394	95	224	174
512	LÁMINAS DE AGUA	79	79	79	230	230

Las zonas de cultivo suponen casi el 16% de la cuenca y, al contrario que las zonas antropizadas, han visto disminuir su superficie de forma importante desde 1990, especialmente a partir de 2006, pasando de suponer casi 24,000 ha en 1990 a las 18,600 ha de la actualidad (Tabla 13). Este proceso es generalizado en la mayor parte de España, sobre todo en zonas de media y alta montaña, donde la dificultad del terreno hace que se vayan abandonando los cultivos y progresando el matorral y el bosque.

Dentro de esta categoría de cultivos se ha producido un descenso muy importante de las zonas de secano, que han pasado de suponer casi 5,400 ha a las poco más de 2,500 ha de la actualidad, habiendo ascendido las de regadío de 1,433 ha en 1990 a más de 2,500 ha en 2018, habiendo marcado un pico de 3,200 ha en 2012. Ascienden también de forma sensible las zonas de prados y praderas, siendo categorías de menor consistencia en su evolución, debido a su marcado carácter de frontera entre otros tipos, las de Mosaico de cultivos y Agrícola con vegetación natural.

Las zonas de vegetación natural han tenido una evolución más fluctuante, dentro de una estabilidad bastante apreciable. En la actualidad suponen el 77% de la cuenca, siendo, de este modo, claramente el conjunto de usos del suelo dominante. Respecto al inicio del periodo de análisis, 1990, tan sólo han incrementado su superficie en unas 1300 ha, si bien su máxima extensión se dio en el año 2012, con 91,230 ha, unas 500 ha más que en la última cartografía de 2018 (Tabla 13).

Internamente se aprecia una mayor importancia de los bosques de frondosas, que pasan de poco más de 20,000 ha en 1990 a casi 25,000 ha en 2018, una pérdida de peso de los bosques mixtos y los pastizales naturales, mientras que las categorías de matorrales, en sus distintas tipologías, han pasado de totalizar algo menos de 35,000 ha en 1990, descendiendo hasta las 27,000 ha en los años centrales, suponiendo hoy casi 45,000 ha en total (Tabla 13). Llama la atención de nuevo, por ajustes en la metodología de identificación, la pérdida de peso de las superficies de roqueda, que pasan de unas constantes 5,000 ha en los tres primeros años, a poco más de 500 ha en los años 2012 y 2018. Muy probablemente estas zonas hayan pasado a englobar, en buena medida, zonas de matorral, que han ascendido de forma sensible.

Finalmente se incluyen las categorías de zonas quemadas y láminas de agua, que a duras penas alcanzan el 1% de superficie total de la cuenca. Las láminas de agua pasaron de 79 ha a 230 entre 2006 y 2012, mientras que las zonas quemadas han ido fluctuando entre las 0 ha de 1990 y las casi 400 ha del año 2000, suponiendo en la actualidad casi 175 ha.

Toda la información cartográfica generada en este apartado se adjunta en los Anejos siguientes:

Anejo A: Serie por tramos de usos año 1956 con foto 1956 de fondo. Ídem 1977, 2002, 2008 y 2017.

Anejo B: Serie por tramos de la superficie ocupada por la lámina de agua de todos los años. Serie por tramos de la superficie ocupada por barras de todos los años

Anejo C: Mapas de nivel de cuenca del CLC para cada uno de los años con categorías agrupadas (urbano, agrícola, forestal, incendios, lámina de agua)

13 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA ANCHURA DEL BERNESGA

La evolución de las áreas que ocupan los depósitos aluviales, ver §11, nos sirve también para analizar cómo ha evolucionado la anchura del Bernesga desde que hay fotografía aérea. La anchura media de un tramo concreto se obtiene de dividir la superficie de cauce (suma de la superficie de lámina de agua, barras aluviales y vegetación primicolonizadora) entre la longitud del cauce en ese tramo.

La incisión en ríos aluviales ocurre de forma simultánea a su estrechamiento. Estrechamiento e incisión son pues procesos relacionados entre sí: a veces es la incisión la que provoca el estrechamiento del cauce y otras veces es al revés. Cuanto mayor es el estrechamiento de un cauce, mayor es la incisión que se puede esperar. Es por este motivo por el que los cambios de anchura del Bernesga nos dan información cuantitativa, aunque indirecta, de la magnitud de la incisión.

Se han trazado los ejes del cauce sobre las fotografías aéreas de 1956, 1977, 2002 y 2017 (las fotografías aéreas consideradas en §11). La morfología del cauce en 1956 es la propia de un cauce trenzado, con múltiples cauces activos, gran abundancia de material aluvial y escasa

presencia de vegetación. Por definición, un cauce trezado tiene diversos cauces activos que desarrollan curvas y meandros. Esto hace que: 1) sea difícil decidir sobre la fotografía aérea de 1956 cuál de los cauces visibles es el principal, que se debe usar para obtener la anchura media, y que 2) debido las curvas y meandros, cualquiera de los cauces que se tracen siguiendo uno de los brazos significará un aumento de la longitud del río y una consiguiente reducción, espuria, de las anchuras así obtenidas. Es por ello que, para la fotografía de 1956, se usa el eje del cauce de 2017, que podría ser considerado como el eje del valle (más corto y recto que el del río) sobre el que discurre el cauce.

Tabla 14. Tramos considerados para el análisis de la evolución de la anchura del cauce. La coordenada longitudinal media de cada tramo corresponde a la obtenida con el perfil longitudinal de 2017 (Tabla 6). Se incluye la longitud del cauce por tramos medida según el eje de unos de los brazos del Bernesga en 1956. Esta longitud se usa a efectos de evidenciar la disminución de longitud (de 4.1 km aproximadamente, ver §11), no a efectos del cálculo de la anchura media por tramos.

tramo	inicio	final	coord. media (m)	longitud (m)			
				1956 según 1956	1956 según 2017	1977	2002
1	arroyo Valdeposadas	puente Carbajal de la Legua	26,486	5,892	5,435	6,066	5,680
2	Carbajal de la Legua	Final Actuación 2009, TM León	21,233		5,070	5,599	5,113
3	Final Actuación 2009, TM León	Puente C. Luis Pastrana	18,156	8,245	1,084	1,086	1,092
4	Puente C. Luis Pastrana	Puente San Marcos	16,951		1,326	1,340	1,319
5	Puente San Marcos	Puente Leones	15,955	1,975	666	656	655
6	Puente Leones	N-630	15,030		1,183	1,189	1,178
7	N-630	Confluencia Torío	13,543	2,260	1,792	1,858	1,797
8	Confluencia Torío	Vado	11,598	2,540	2,098	2,759	2,097
9	vado	Puente Alija de la Ribera	8,360	5,033	4,378	5,094	4,330
10	Puente Alija de la Ribera	Esla	3,085	7,432	6,171	6,465	6,132

total arroyo Valdeposadas	Esla	-	33,376	29,203	32,111	29,392
----------------------------------	-------------	----------	---------------	---------------	---------------	---------------

La morfología del cauce del cauce en 1977 ya es la de un río meandriforme: ha perdido casi por completo el carácter trezado de 1956 pero aún conserva cierta sinuosidad (sobre todo en los extremos del tramo de estudio, no en la Ciudad de León). Esta sinuosidad se reduce de forma paulatina en 2002 y más todavía en 2017. Esto hace que se usen los ejes del cauce de 1977, 2002 y 2017 para obtener la anchura media en cada año.

La longitud total del Bernesga, de unos 30 km aproximadamente, se ha dividido en 10 tramos. La división en tramos responde a criterios morfológicos (p.e. antes y después de la confluencia con el Torío) pero también a la división que imponen las obras y canalizaciones que se han realizado de forma sucesiva desde principios del s. XX. La Tabla 14 detalla los distintos tramos en los que se ha dividido el Bernesga.

Tabla 15. Anchura media del Bernesga en cada tramo en 1956, 1977, 2002 y 2017.

Tramo	Coord. longitudinal (m)	B (m)			
		1956	1977	2002	2017
1	26486	233	163	54	38
2	21233	238	135	68	43
3	18156	173	49	43	17
4	16951	158	67	58	39
5	15955	104	33	36	32
6	15030	124	61	32	24
7	13543	176	81	33	28
8	11598	543	105	49	40
9	8360	365	182	96	29
10	3085	400	271	89	40

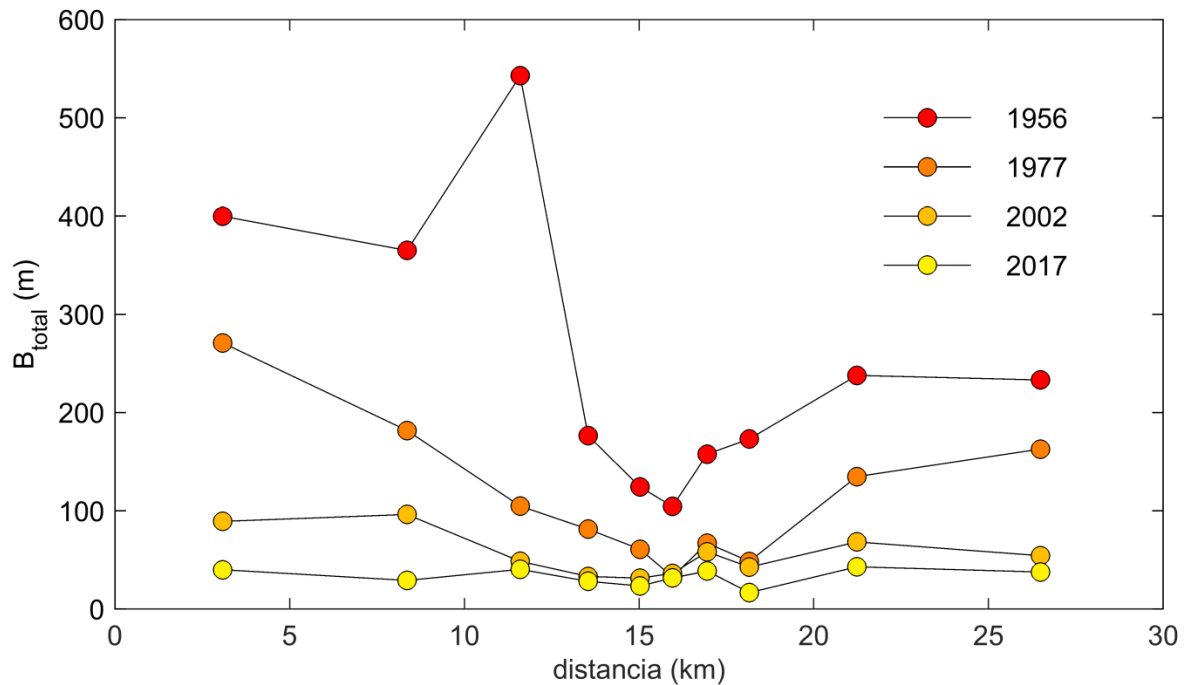


Figura 58. Evolución temporal de la distribución espacial de la anchura media del cauce. La abscisa de los datos representa la coordenada media de cada uno de los tramos en que se ha dividido el estudio. Dichas coordenadas están en la Tabla 14.

Los resultados de la Tabla 15, representados en la Figura 58, ilustran, en general, una fuerte reducción de la anchura del cauce desde 1956. La anchura del Bernesga se reduce entre 1956 y 2017, en términos generales, en un 84%. Es el tramo aguas abajo de la confluencia del Torío donde la reducción es mayor, de un 92%. El estrechamiento general del cauce es menos drástico con el paso del tiempo: así, mientras que la reducción media de la anchura entre 1977 y 1956 es del 54%, el estrechamiento promedio entre 2002 y 2017 es del 36%.

Los resultados de 1956 muestran claramente que la anchura del cauce a su paso por la zona urbana de León ya había sido reducida. Esta reducción es el efecto de la primera canalización entre los puentes de San Marcos y de los Leones (tramo 5 en la Tabla 14) finalizado en 1911, Tabla 6, que redujo la anchura de 175 m a 133 m (distancia entre muros). La anchura en el

tramo inmediatamente aguas abajo del puente de los Leones demuestra que los efectos de las obras de canalización, visibles en 1959 (Figura 38 y Figura 42) pero oficialmente finalizadas en 1968 (Tabla 6) ya habían empezado en 1956. En general ya en 1956 se aprecia una ligera reducción de la anchura del Bernesga en todos los tramos cercanos a la Ciudad de León. La contribución del Torío resulta fundamental para entender el gran aumento de la anchura del cauce en los tres últimos tramos.

La anchura media a lo largo de todo el cauce sufre una gran reducción en 1977. Las mayores reducciones se dan aguas abajo del Torío y en el tramo inmediatamente aguas arriba del puente de San Marcos, donde son un 81% y un 72%, respectivamente. En el primer caso, pensamos que la reducción del ancho del cauce está relacionada con las extracciones de material del lecho en municipios de Villaturiel, Onzonilla y Vega de Infanzones (Figura 1, Figura 53). En el segundo caso, creemos que el estrechamiento del cauce es debido a las canalizaciones del tramo urbano de León, aguas abajo del puente de San Marcos. A estas causas hay que añadir la ocupación de las márgenes del cauce por la silvicultura.

El río continúa su estrechamiento entre 1977 y 2002. Como después de 1983 ya todas las canalizaciones urbanas se han ejecutado, es en esta zona donde el estrechamiento es menor, alrededor del 12%. En el resto de tramos la reducción de la anchura se sitúa en un rango entre el 40% i el 67%. Entre 1977 y 1983 se lleva a cabo el último tramo de la canalización aguas abajo de la confluencia con el Torío. Pensamos también que es cuando se llevan a cabo extracciones de material masivas, sobre todo aguas abajo de esta confluencia.

El proceso de estrechamiento continúa en 2017. Para entonces, los tramos entre donde termina la última gran actuación en el Bernesga en 2009 y el vado inmediatamente aguas abajo de la canalización finalizado en 1983, solo se cuentan 1.9 ha de superficie ocupada por barras aluviales (se excluye la superficie ocupada por agua). Esta superficie representa una anchura equivalente de material aluvial visible de 2.4 m (la longitud del tramo es de 8.1 km). Esto significa que el material aluvial susceptible de ser transportado prácticamente ha desaparecido de este tramo. En realidad, solo los dos tramos superiores tienen una anchura equivalente de barras significativa, que representa un 27% de la anchura total. Esta reducción del material

aluvial en la superficie del cauce, extrema en 2017, había empezado en 1977 en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones y se había propagado en 2002 hacia aguas abajo hasta alcanzar la confluencia con el Torío.

14 ANÁLISIS DEL PERFIL LONGITUDINAL

14.1 Elaboración de los datos de partida

Se han representado gráficamente los perfiles longitudinales por el tálveg de las topografías disponibles hasta el momento. Para poder hacerlos compatibles, todos ellos se han representado sobre el eje de coordenadas del 2017. Se cuenta con la siguiente información (ordenada cronológicamente):

1. Topografía del “Proyecto de canalización del Río Bernesga en León”, **1910**, redactado por Manuel Díaz Sanjurjo. En el proyecto existe una muy buena topografía con curvas de nivel con 0.5 m de equidistancia. Las cotas son relativas. Se han convertido en cotas absolutas mediante la comparación de un punto del plano de 1910 (con cota relativa de 203 m) y el mismo punto procedente de un plano en AutoCad del año 1995 (Proyecto Linde), cuya cota absoluta es 829.98 m. Las coordenadas longitudinales se han ajustado a las de 2017 a través de la posición que ocupaban los puentes de San Marcos y de los Leones. Se obtienen así **125 puntos** del perfil longitudinal que abarcan **1.15 km** en el entorno urbano de León.
2. Planos topográficos de 1912-1925 de los municipios ribereños del Bernesga en el tramo de estudio. Se han delineado las curvas de nivel y se ha calculado su intersección en planta con el eje de 2017. Por eso no ha sido necesario rectificar las coordenadas longitudinales de los puntos de dichas intersecciones. Se han obtenido así **9 puntos** del perfil que abarcan los últimos **25 km** de río. En el plano correspondiente a la desembocadura del Bernesga (del año 1919) aparecen dos cotas en el eje del Esla, separadas entre ellas una distancia de 3.9 km por el eje del cauce. Mediante interpolación lineal, podemos hallar la cota del Bernesga en la desembocadura

asumiendo que hay continuidad entre los tálvegs de los dos ríos. Esta cota consta en las figuras del perfil longitudinal como un dato más.

3. Cota del cauce en el puente de Carbajal de la Legua procedente del proyecto de construcción del puente. La topografía, en coordenadas relativas, procede de un levantamiento topográfico de septiembre de **1933**. La cota relativa se convierte en cota absoluta con la ayuda de perfil transversal del puente de los años 1995 (Proyecto Linde) y 2017.
4. Cota del cauce en el puente de Alija de la Ribera. El dato se ha obtenido del proyecto de dicho puente, de **1963**. Las cotas relativas del puente se han convertido en cotas absolutas gracias a la sección por el puente de 2017.
5. Perfil longitudinal en cotas relativas del proyecto de canalización del tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones de Palancar Panella (**1964**). No sabemos si el perfil longitudinal es por el tálveg, el centro del cauce o por el extremo izquierdo de la sección transversal donde se ubica el muro de la canalización, objeto éste último del proyecto. La morfología del cauce en esta zona alrededor de 1960 todavía mantenía el aspecto (anchura, profundidad) de un cauce trenzado (aunque más estrecho). Esto nos hace pensar que las diferencias entre las cotas del lecho por el tálveg y siguiendo el perfil longitudinal eran pequeñas. Las cotas relativas del proyecto se han convertido en cotas absolutas con la ayuda de la cota de coronación del azud de San Marcos. Se han obtenido así **22 puntos** del perfil longitudinal.
6. Perfil longitudinal alrededor del puente de los Leones procedente del proyecto de construcción del azud situado aguas abajo del puente (Palancar, **1968**). Se han obtenido así **6 puntos** en una longitud de 1.1 km.
7. Cota del cauce en **1972** para la construcción de un futuro puente situado 827 m aguas arriba del puente de San Marcos.
8. Perfiles longitudinales (en cotas absolutas) del proyecto de prolongación de la canalización del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío (Pérez Alfonso, 1975, 1977). Los perfiles longitudinales corresponden a las alineaciones de los muros derecho e izquierdo de la canalización. Como el proyecto consistía en una corta de tres

meandros, limitando el río entre los muros, solo se han considerado aquellos puntos del perfil de ambos muros que coincidían con el cruce del cauce del Bernesga en el momento en que se realizaron las topografías. En total, se han obtenido así **7 puntos** del proyecto de **1975** y **10 puntos** de la modificación del proyecto de **1977**.

9. Secciones transversales del proyecto Linde (**1995**). Se trata de información digitalizada en archivos de Autocad. Está representada en el sistema de referencia ED1950. Esta información se ha transformado al sistema ETRS1989 Huso 30N para hacerla compatible con la información topográfica de 2017. Posteriormente se ha obtenido la intersección de estas secciones con el eje del Bernesga de 2017, con lo que no ha sido necesario el ajuste de las coordenadas longitudinales. Se han obtenido así **78 secciones** transversales que cubren todo el tramo de estudio.
10. Secciones transversales del río Bernesga procedentes del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (**2009-2010**). En una parte del documento que acompaña la información cartográfica se dice que “El vuelo LIDAR se ha complementado con un exhaustivo reconocimiento de campo del río Bernesga, procediendo también al levantamiento de perfiles transversales para determinar el cauce del río y su profundidad”. En ninguna otra parte del documento constan las secciones que se han realizado ni dónde. En total, de esta fuente de información se obtienen **250 secciones** transversales de todo el tramo de estudio.
11. Cota del tálveg en una sección entre la pasarela 1 y el puente de la calle Luis Pastrana. La información se ha obtenido del “Proyecto de ejecución de las obras de acondicionamiento y mejoras de los márgenes del río Bernesga en el T.M. de León” (**2009**). La coordenada longitudinal se ha obtenido de la intersección del eje de 2017 con la sección transversal.
12. Cota del tálveg en la sección de la pasarela 10. El dato se ha obtenido del “Proyecto de ejecución de las obras de acondicionamiento y mejoras de las márgenes de los ríos Bernesga y Torío en el T.M. de León” (**2010**).

13. Cotas alrededor de tres traviesas en el entorno de León que fueron demolidas entre **junio y julio de 2017**, es decir antes de la topografía de noviembre de 2017, realizada específicamente para este estudio. Se han obtenido así **19 puntos** a lo largo de **0.9 km**.
14. Datos procedentes la batimetría tomada específicamente para este trabajo y que ha constituido la base para el modelo hidráulico en Hec-Ras, ver §5 (**noviembre de 2017**). Se han considerado los datos batimétricos directamente proporcionados de la campaña de medidas de campo (no su elaboración posterior para obtener las secciones transversales para el modelo hidráulico en Hec-Ras). Los datos proporcionados ascienden 12385 puntos. Estos datos se organizan en conjuntos de datos que forman secciones transversales y datos en los que el bote con el que se tomaron las medidas se desplaza longitudinalmente. De los primeros se puede obtener la cota del tálveg de cada sección transversal que se cruza con el eje del río. Del segundo grupo de datos no podemos hallar el tálveg (se dispone de un dato batimétrico por cada sección). Los datos del tálveg representan, por definición, una cota inferior de la cota del lecho en un punto del perfil. Se ha obtenido así el tálveg de **291 secciones** que cubren los **30 km** de estudio. Respecto a los datos longitudinales, se han obtenido **3670 puntos**, situados principalmente entre las coordenadas 6.2 km y 13.5 km. También se han obtenido datos alrededor de las coordenadas longitudinales 15.5 km y 28.8 km.

Las Figura 59-Figura 65 ilustran la comparación de estos perfiles longitudinales históricos disponibles.

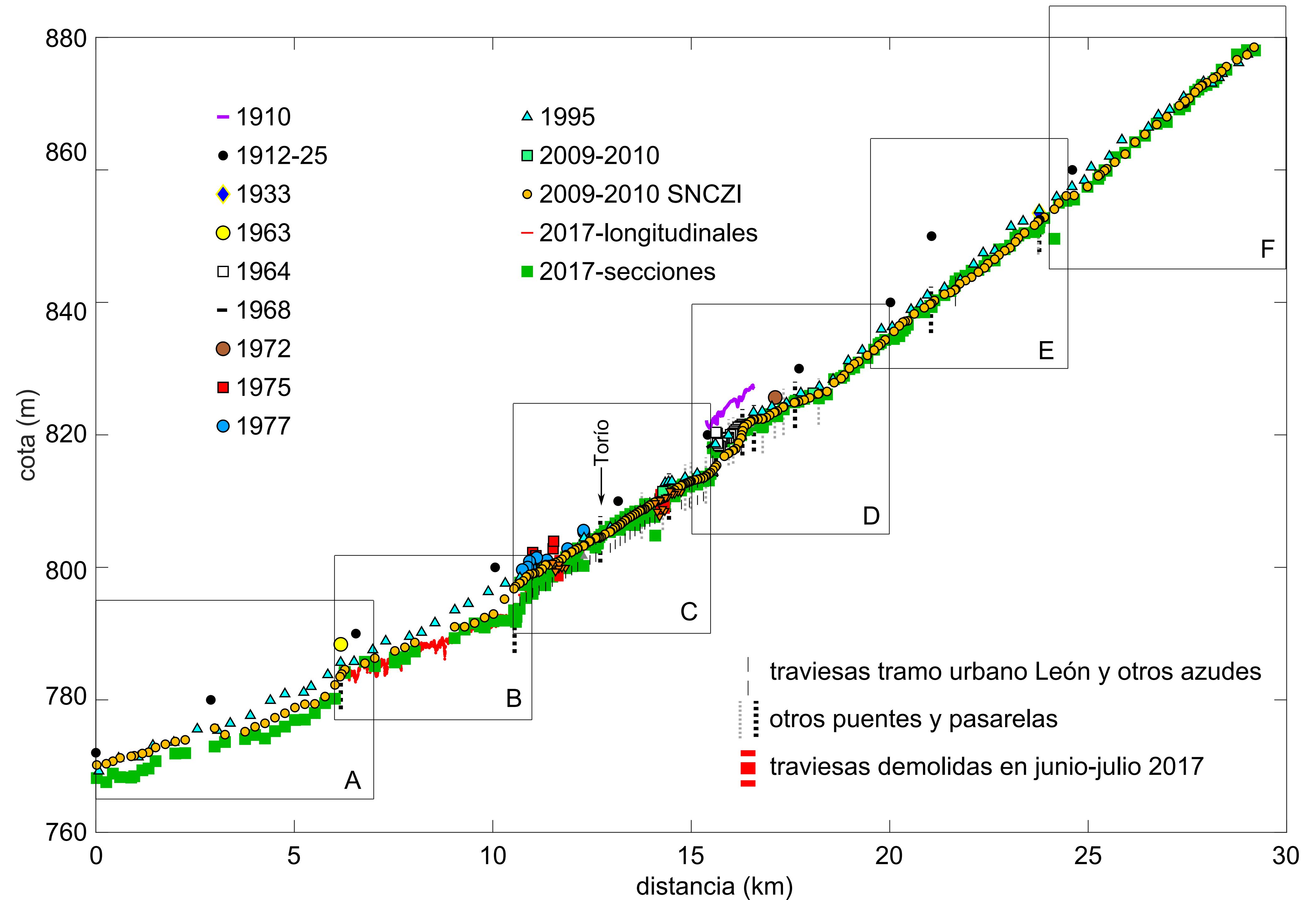


Figura 59. Plano llave del perfil longitudinal del Bernesga

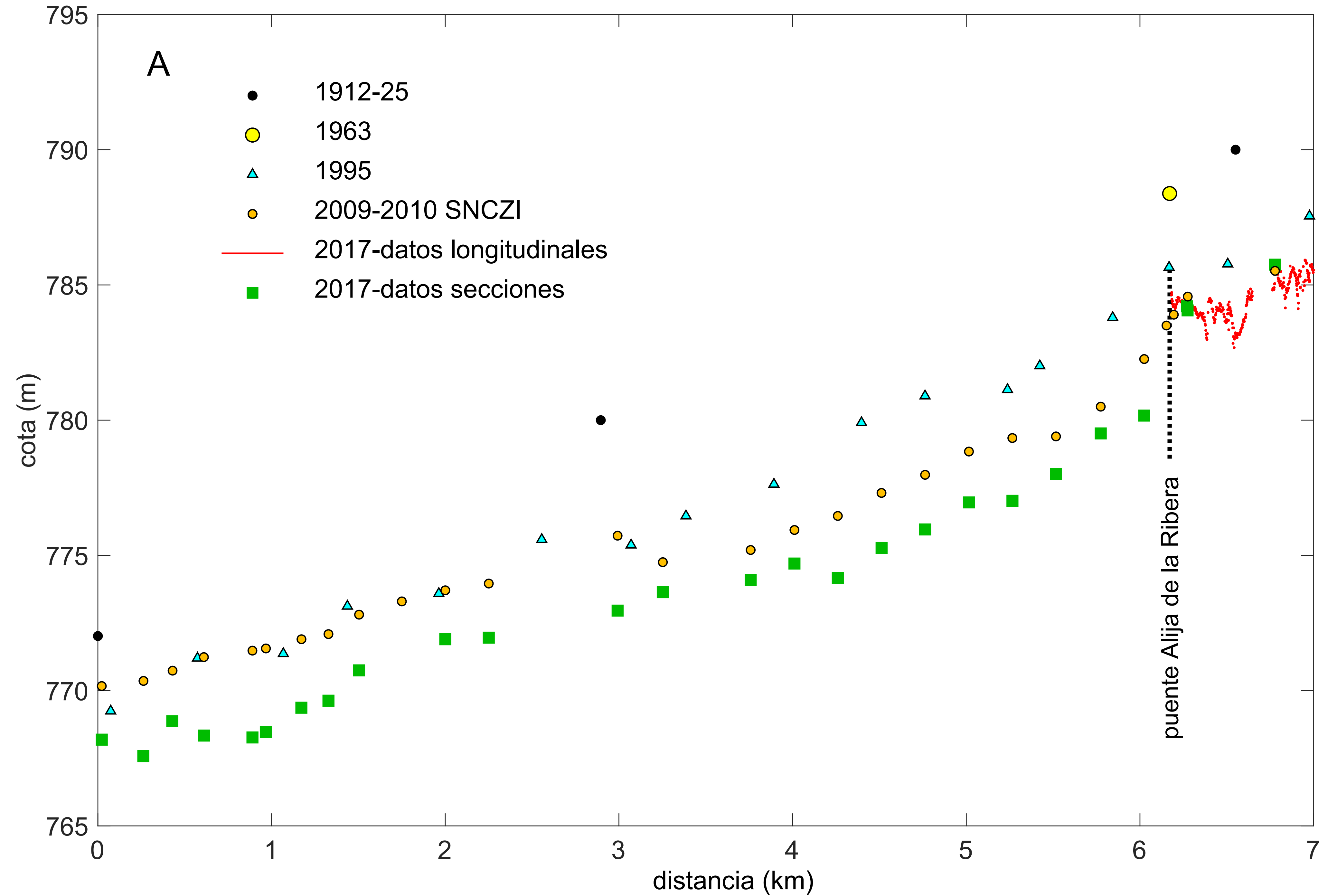


Figura 60. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde s = 0 km hasta s = 7 km

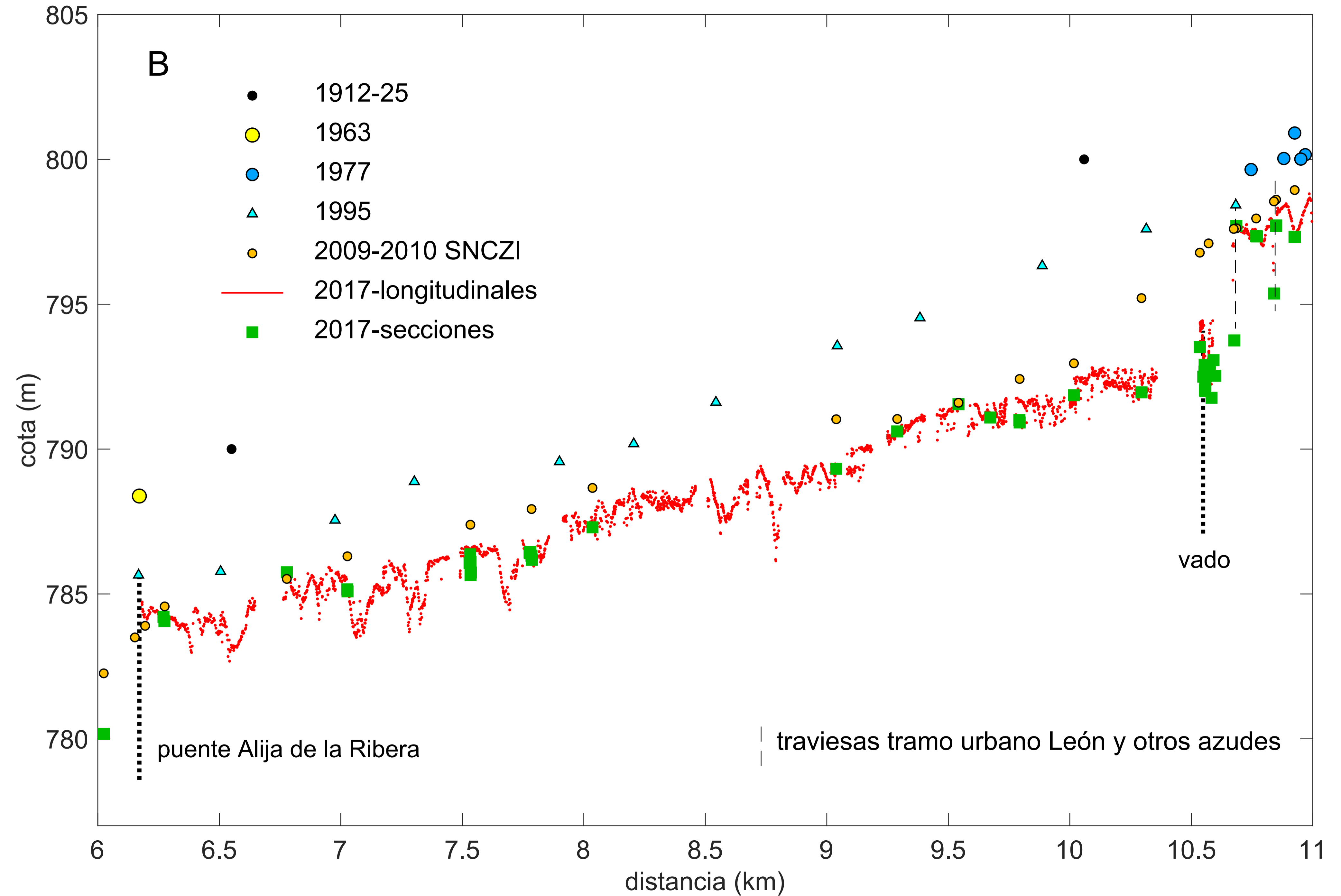


Figura 61. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde s = 6 km hasta s = 11 km

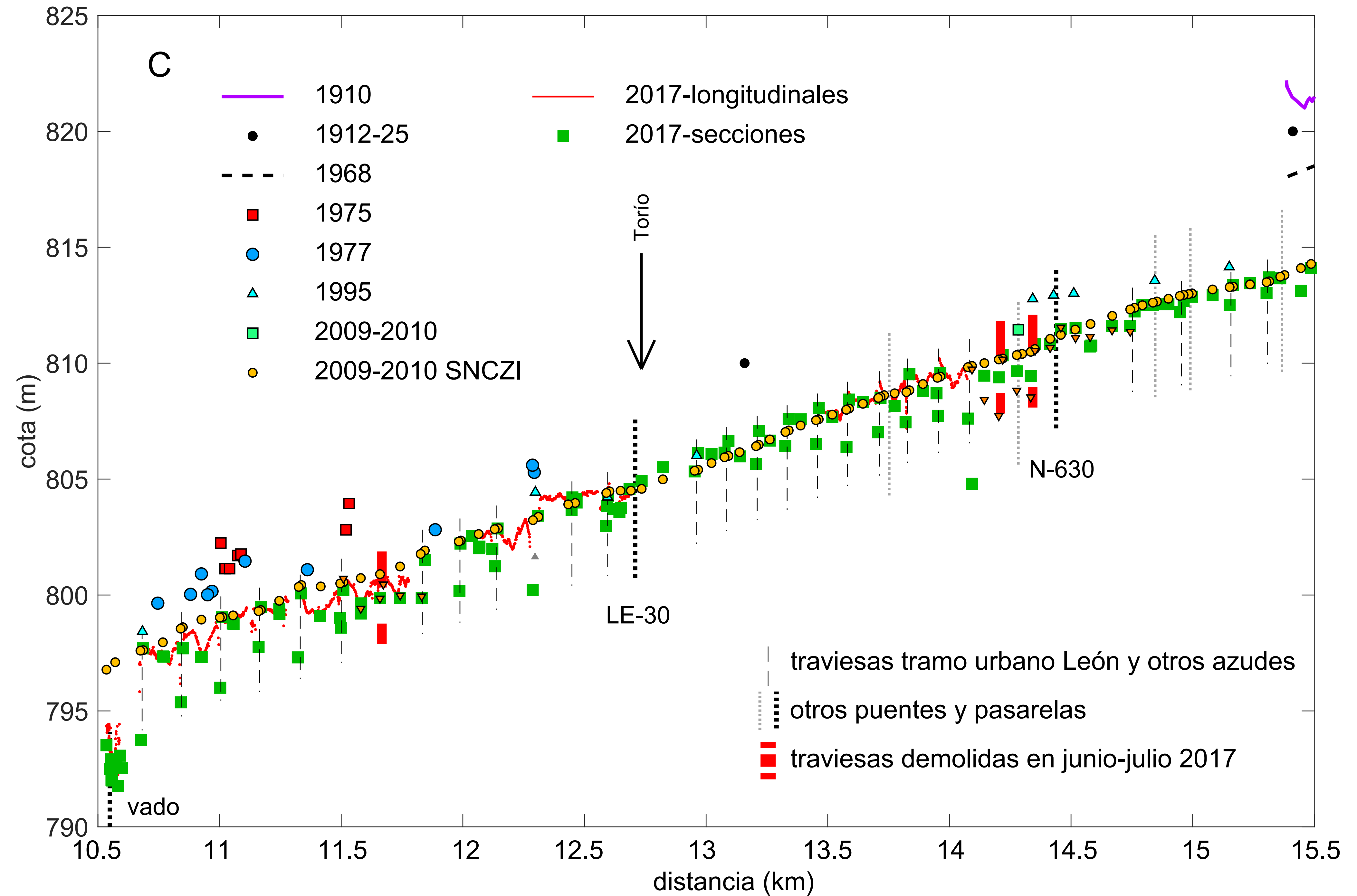


Figura 62. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde $s = 10.5$ km hasta $s = 15.5$ km

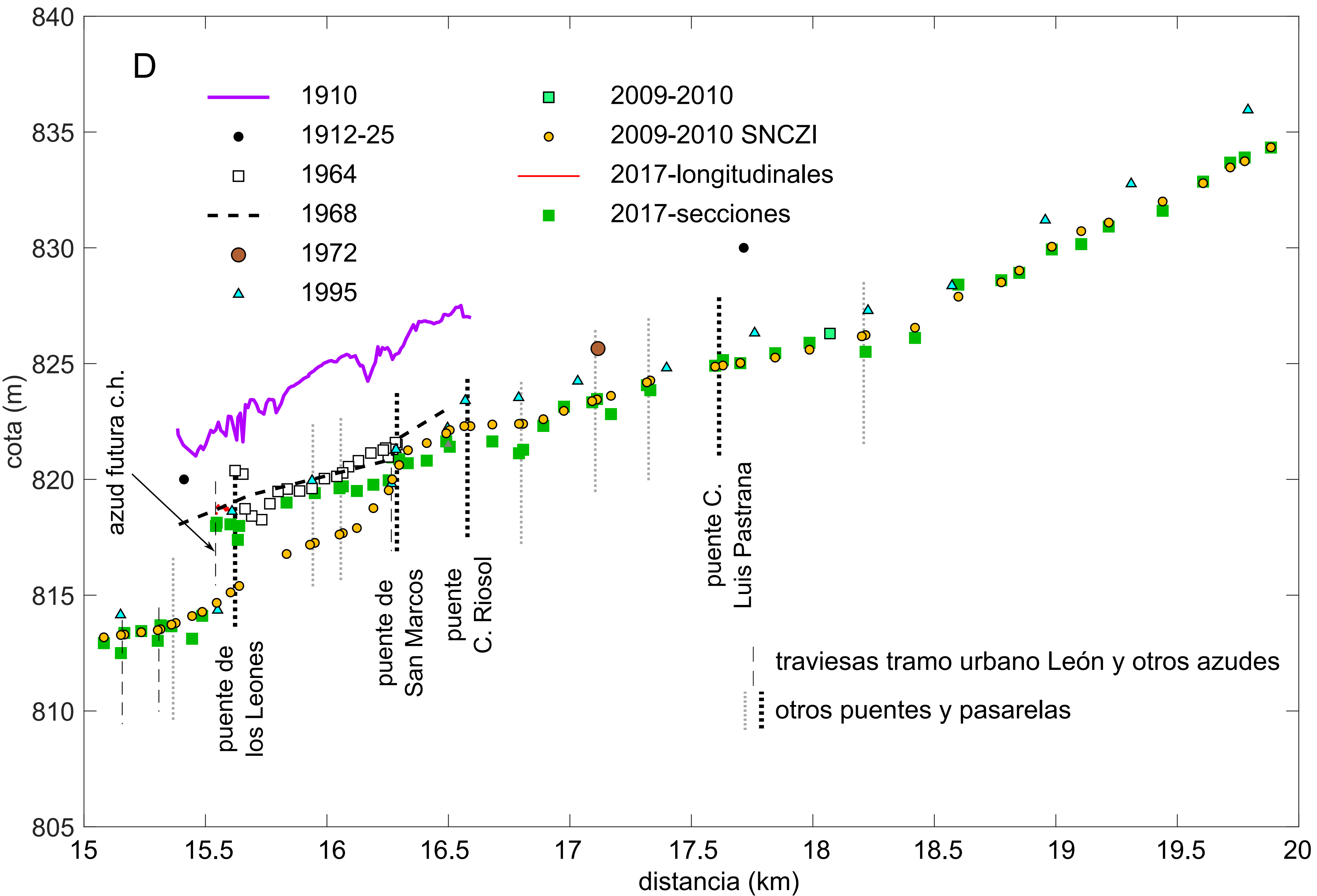


Figura 63. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde s = 15 km hasta s = 20 km

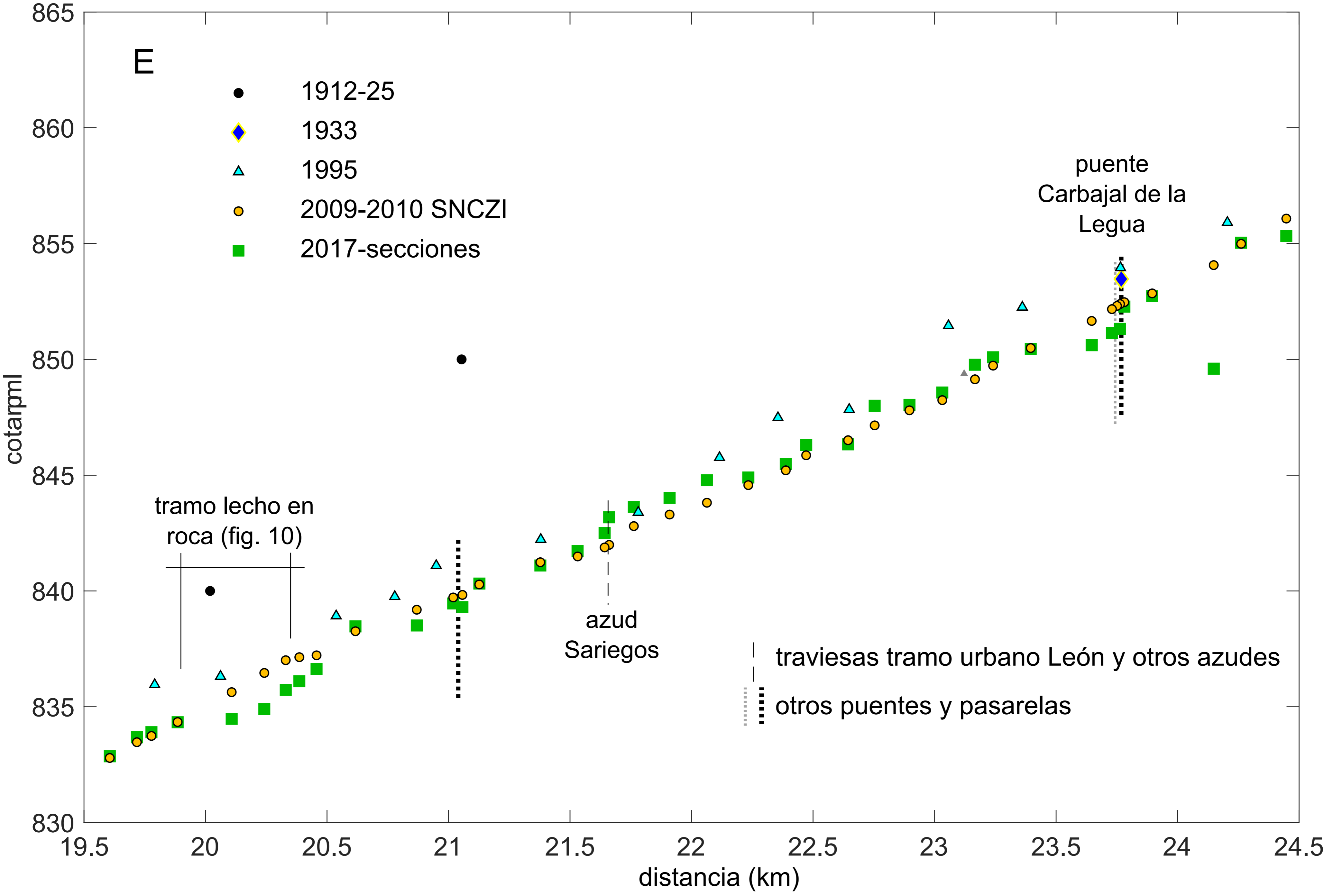


Figura 64. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde s = 19.5 km hasta s = 24.5 km

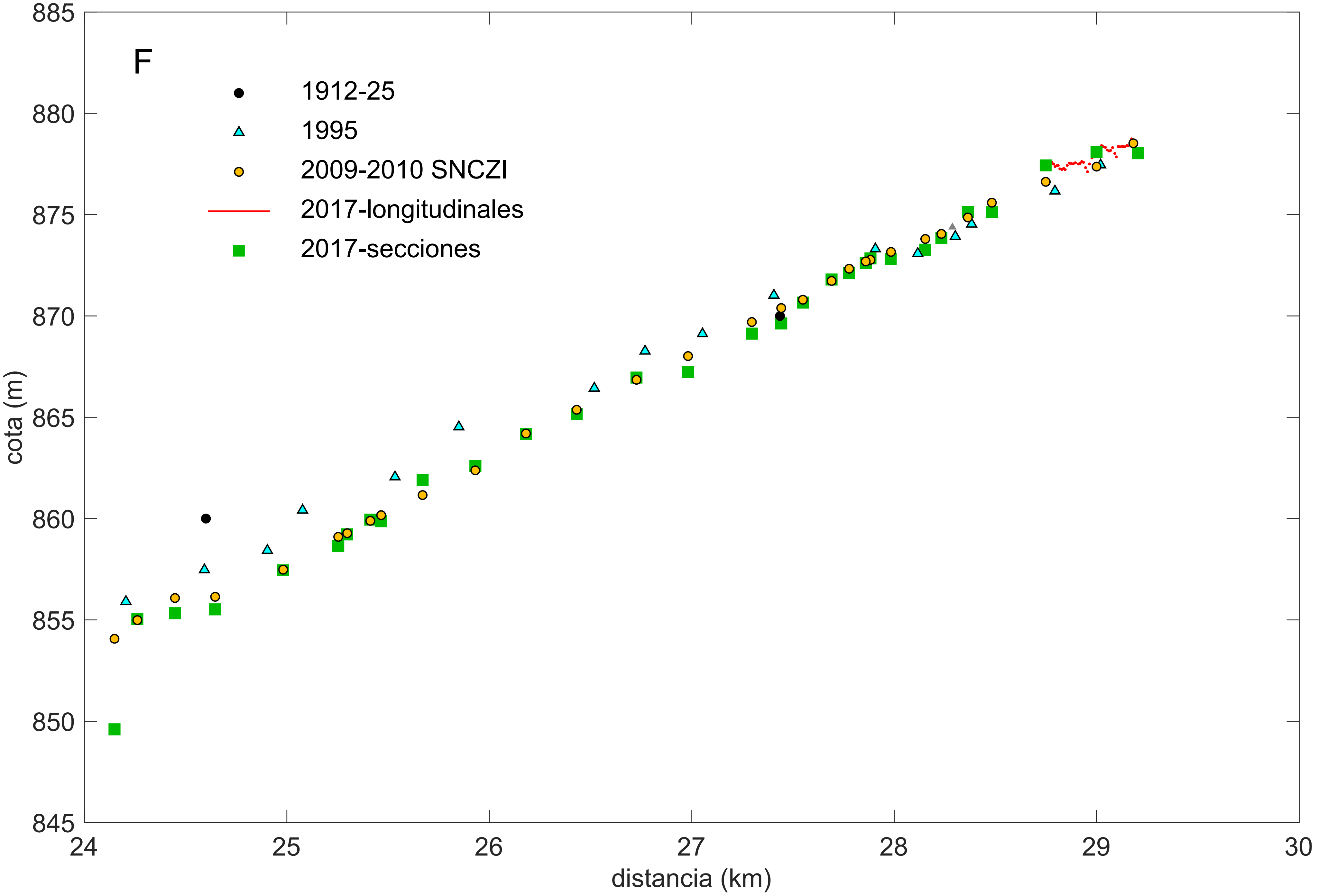


Figura 65. Perfil longitudinal del tramo del Bernesga desde s = 24 km hasta s = 30 km

14.2 Perfil longitudinal prístino

Los datos del proyecto de 1910, de las topografías de 1912-25 y el del proyecto de construcción del puente de Carbajal de la Legua (1933) se han agrupado para formar un perfil longitudinal original o prístino del río. Aunque en 1911 se termina la primera fase de la canalización del río (Tabla 6), sus dimensiones y la anchura del cauce entre muros nos hacen pensar en un impacto menor sobre el perfil del Bernesga en las zonas más alejadas al tramo canalizado en 1911. Este perfil prístino nos servirá como nivel de fondo de referencia para calcular la incisión media en distintos tramos a lo largo del Bernesga. Sin embargo, para analizar la incisión en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones, consideraremos los datos desagregados para de este modo poder analizar la evolución del lecho después de la primera canalización de 1910. Para este tramo, entonces, el perfil prístino lo forman exclusivamente los datos de 1910. En este sentido, recordamos que los puntos del perfil de 1912-25 en la Ciudad de León (cotas 810, 820, 830 y 840 m.s.n.m. Figura 59, Figura 61) pertenecen a un mapa topográfico de 1925, es decir, 15 años posterior a la topografía de 1910.

Los datos conjuntos de 1910, 1912-25 y 1933 describen un perfil longitudinal cóncavo, típico de ríos aluviales. Se ha ajustado una ecuación de tipo potencial a estos datos: $z(x) = a(x - x_0)^b + z_0$, en la que $P_0 = (x_0, z_0)$ son las coordenadas en la desembocadura (abscisa inicial): $P_0 = (0, 772.02)$. Para que los datos de 1910, mucho más numerosos que el resto, no condicionen en exceso el resultado de la interpolación, las coordenadas de los puntos han sido ponderadas según el número de datos y el inverso de la longitud que abarcan. Se han considerado pues dos conjuntos de datos: los 125 de 1910, y los 10 de 1912-1925 más el dato del puente de Carbajal de la Legua. Los parámetros a y b de la ecuación potencial se ajustan por mínimos cuadrados resultando que $a = 8.00 \cdot 10^{-4}$ y $b = 1.14$. El coeficiente de correlación resultante de la interpolación $R^2 = 0.99$. Aunque la ecuación se ajusta bien a los datos (Figura 66), el rango de cotas del perfil (que alcanza casi 100 m) hace que los errores relativos (pequeños) puedan ser moderadamente elevados cuando se consideran de forma absoluta. Este hecho es significativo en el tramo situado entre las abscisas $s = 10$ -15 km (Figura 66). Con el fin de no descartar de forma arbitraria ningún dato, se han considerado todos los datos si

bien pensamos que a la vista del perfil longitudinal completo, la abscisa asociada a la curva de nivel $z = 850$ m ($s \sim 21.1$ km) es anómala. Es destacable que, aunque los datos con los que se obtiene el perfil prístino tienen orígenes diversos, se agrupan bien en torno a una única ecuación.

Otra verificación del perfil prístino es la pendiente de 0.00508 m/m dada a la obra de encauzamiento acabada en 1911. La pendiente de los 125 datos de ese proyecto es 0.00509 m/m por regresión lineal. Como se ha dicho al describir la actuación, las características finales del río (anchura, pendiente) no fueron muy diferentes a las naturales.

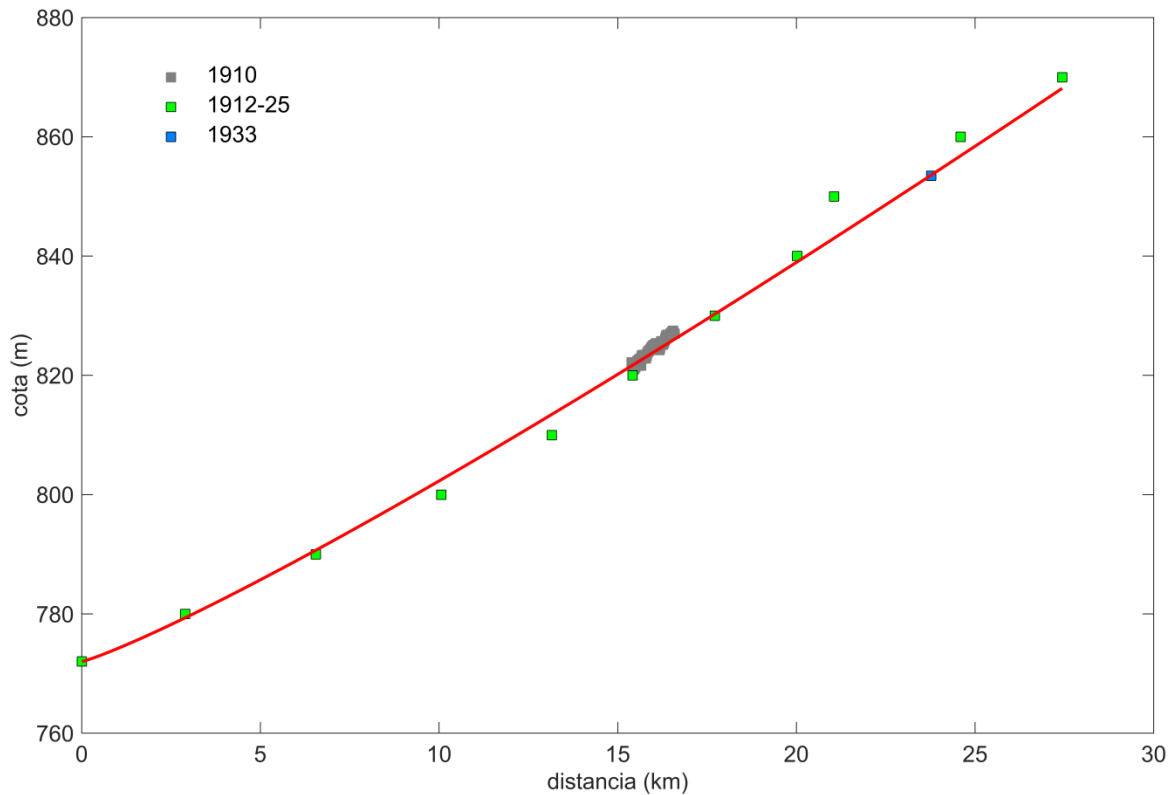


Figura 66. Comparación del perfil longitudinal prístino con los datos de 1910, 1912-25 y 1933 usados para determinarlo.

14.3 Consideraciones generales sobre las causas de incisión

Entre las causas de la incisión del Bernesga destacan las canalizaciones realizadas entre 1911 y 2009 (Tabla 6). Estas canalizaciones implicaron en todos los casos una fuerte reducción de la anchura del cauce. Además, en varios casos fueron acompañadas de corte de meandros y curvas que supusieron también una reducción de la longitud del río. Finalmente, y aunque solo se ha podido documentar en algunos casos, pensamos que las obras de canalización incluyeron la extracción de material del lecho como práctica habitual: muchos proyectos consultados mencionan la necesidad de usar material aluvial del río para la construcción de muros y traviesas. Las canalizaciones, por tanto, además de un estrechamiento implican acortamientos y extracción de áridos. Si decimos que las canalizaciones son la primera causa de incisión, nos referimos a la reducción de anchura y a la reducción de longitud (dos causas en una) ya que la extracción de áridos ya se ha considerado aparte (Tabla 8). La primera causa es doble.

En efecto, entre las acciones que han causado la incisión del lecho está, en segundo lugar, la extracción de material aluvial del cauce, como actividad expresa, no vinculada a las canalizaciones, que se suma a la vinculada en la Tabla 8. Este material, conjuntamente con el extraído del Torío, podría representar, según técnicos de la CHD, entre el 60%-70% del consumo de árido durante la expansión en el siglo XX-XXI de la Ciudad de León (comunicación personal). Señalamos, igual que antes, que no se han podido obtener los datos de los volúmenes de material extraído antes de 1987, cuando se cree que la actividad extractiva fue de mayor magnitud.

La tercera causa posible de incisión del Bernesga es la disminución de la disponibilidad de sedimento por el abandono de cultivos y su substitución por el bosque en la cuenca. Este proceso se inició durante la segunda mitad del siglo XX y aún hoy es un proceso en curso. El tiempo transcurrido entre el instante en que se inician los cambios en la cuenca y el momento en que sus efectos empiezan a ser perceptibles en el río (que puede ser de varios años o décadas) nos hace pensar que en la actualidad el Bernesga está todavía en un estado transitorio hacia un nuevo equilibrio fluvial caracterizado por una menor aportación sólida.

Como se verá más adelante, otros aspectos como el papel jugado por el Esla y el Torío, también podrían haber contribuido a la incisión del Bernesga. En el caso del Esla, punto final del Bernesga, su descenso de fondo se puede considerar como cuarta causa de incisión, pues arrastra para abajo la cota del lecho del Bernesga, dado que entre los dos lechos hay continuidad aluvial en la confluencia. Como la desembocadura del Torío se encuentra en medio del tramo de estudio, en este caso hay que pensar en que la contribución de agua y sólidos del afluente Torío al río Bernesga, si se ve alterada, puede ser causa de incisión (quinta causa).

Aún como sexta causa de incisión, o más exactamente del gradiente espacial de la incisión, como veremos más adelante, se puede contar la construcción de traviesas, que irónicamente se consideran medios para frenarla.

En este apartado se detallan los efectos de estas acciones sobre el perfil y la morfología fluvial de un río y se ponen en relación con los datos históricos recogidos, elaborados y mostrados conjuntamente en las figuras del perfil longitudinal del Bernesga (Figura 59-Figura 62). Todo ello es útil para explicar las causas de la incisión que ha sufrido el río.

Discusión del estrechamiento y el acortamiento

El efecto hidráulico de estrechar el cauce es un aumento del caudal unitario q : el caudal total Q se mantiene constante pero la anchura por la que circula disminuye. Este aumento del caudal unitario es el que produce la erosión del cauce por contracción: partiendo del perfil longitudinal inicial, el lecho se erosionará una vez que el cauce se haya estrechado hasta que las condiciones del tramo estrecho sean tales que el río pueda transportar el caudal sólido suministrado desde aguas arriba. En ese momento, se habrá alcanzado el equilibrio tras la intervención.

El equilibrio del perfil longitudinal está controlado por la pendiente y la anchura del cauce S y B respectivamente, el tamaño característico del material del lecho D y los caudales líquido y sólido, Q y Q_s . La siguiente relación entre las variables anteriores debe cumplirse para que el cauce esté en equilibrio:

$$Q_s D^{3/2} \propto \frac{Q^2}{B} S^2$$

Se trata de una versión cuantitativa de la analogía de la balanza de Lane (1955) para el equilibrio del perfil longitudinal de un río (Martín-Vide, 2007). Después del estrechamiento, el equilibrio del cauce se restablecerá, como se ha dicho antes, cuando el tramo estrecho pueda transportar el sedimento aportado desde aguas arriba, que no tiene por qué variar por haber estrechado un cierto tramo. En igualdad de condiciones de caudal antes y después del estrechamiento, esto significa que el cociente S^2/B debe mantenerse constante (ni el tamaño característico del lecho ni la aportación sólida varían). Por lo tanto, el lecho se erosionará hasta alcanzar una nueva pendiente (menor, ya que la anchura disminuye) que cumpla con la relación anterior. Q significa el caudal dominante y Q_s el de caudal sólido aportado grueso (con origen en el fondo).

La erosión por estrechamiento a largo plazo e (cuando se haya alcanzado la pendiente de equilibrio) puede estimarse como: $e = y_{n0}[(B_0/B_1)^{0.67} - 1]$, siendo y_{n0} el calado normal antes del estrechamiento y B_0 y B_1 las anchuras del río antes y después de la canalización (Martín-Vide, 2007). El cociente e/y_{n0} representa la proporción de la erosión respecto al calado en el tramo. El exponente, tomado aquí como 0.67 es en realidad un parámetro función del exceso de tensión media en el lecho τ respecto a la crítica para el inicio de movimiento de las partículas, τ_c . y el valor 0.67 se alcanza cuando $\tau \gg \tau_c$. Se obtienen valores mayores del exponente si la tensión media en el fondo es entre 1-3 veces mayor que la tensión de inicio de movimiento, como pasa habitualmente en ríos de grava. Entonces, las erosiones estimadas son sensiblemente mayores.

A menudo, las obras de estrechamiento se hacen conjuntamente con el dragado del cauce. En caso de acción simultánea, estrechamiento y dragado, el valor de la erosión esperable es, a corto plazo, la máxima de las dos, es decir que el resultado de las acciones (incisión) no se acumula. Esto significa que si un cauce se estrecha y de forma simultánea sufre un dragado cuya magnitud supone una erosión mayor que la esperable por el cambio de anchura, el cauce no tiene necesidad de profundizarse más para alcanzar el equilibrio. Al contrario, a largo plazo, esta excavación tenderá a llenarse de sedimento hasta que la pendiente (y la erosión) sean las dictadas por el cambio de anchura. Recordemos que, a igualdad del resto de variables que

controlan el perfil longitudinal del río (Q_s , Q , S , y D), es el cambio de anchura B el que modifica el equilibrio. En el transitorio entre el corto y el largo plazo, si la excavación es de gran magnitud, la pendiente del fondo en la transición entre el área dragada y el tramo adyacente aguas arriba podría ocurrir una erosión regresiva que a su vez contribuiría al llenado del espacio excavado.

Finalmente, en varias de las fases de la canalización del río Bernesga, la canalización ha supuesto una reducción de la longitud del río. Esto es bien visible en las fases cuarta (Figura 47) y quinta (Figura 49) de la canalización, aguas abajo del puente de la carretera N-630, Tabla 6. La consecuencia inmediata de la pérdida de longitud de un cauce es el aumento de la pendiente del fondo. Según la versión cuantitativa de la analogía de la balanza de Lane anterior, este aumento de pendiente tiene como efecto una erosión gradual del lecho que progresa hacia aguas arriba (asociada a una reducción paulatina de la pendiente) que, cuando se ha desarrollado completamente, es decir cuando el río ha recuperado el equilibrio, se puede calcular como $e = \Delta L \cdot S$, siendo ΔL el cambio (reducción) de longitud en m y S la pendiente inicial (m/m). La vuelta al estado de equilibrio fluvial significa que el cauce recupera, si no hay cambios en el resto de variables que lo controlan, su pendiente inicial.

Un último efecto de las canalizaciones sobre la morfología de ríos es la reducción de la anchura del cauce mediante muros, que impide que el sedimento disponible (en forma de barras, islas, etc.) situado más allá de los muros pueda participar del transporte sólido. Esto supone en la práctica una disminución de la disponibilidad de material hacia tramos aguas abajo del que ha sido encauzado. Al río se le priva de una fuente de sedimento grueso. Según la relación entre las variables que explican el equilibrio fluvial (balanza de Lane), cualquier reducción del suministro de material hacia aguas abajo se compensa con una reducción de la pendiente, que es el modo habitual en que el cauce intenta recuperar la estabilidad. El perfil longitudinal rota o gira alrededor de un punto de apoyo lejano en la dirección del flujo, un punto no afectado por la reducción de la disponibilidad de material sólido. Es esta rotación del perfil longitudinal la que traduce la disminución de la pendiente en una pérdida de cota, es decir en incisión.

Discusión de la extracción de material aluvial

Además de las obras ligadas a las canalizaciones, la extracción de material aluvial del lecho, de gran intensidad en el Bernesga, ver §10.4, tiene efectos importantes sobre la morfología fluvial. El primero y más destacado es la incisión, que no se limita a la zona objeto de extracciones, sino que puede afectar a tramos de longitud kilométrica, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo.

La extracción de material supone, para los tramos situados aguas abajo de la extracción, una reducción de la disponibilidad de sedimento, pues una parte de ésta, o toda según la magnitud de la extracción, es precisamente el volumen de material que se extrae. Según la analogía de la balanza de Lane, una reducción de la aportación sólida Q_s implica una erosión del lecho porque el río mantiene la misma capacidad de transporte, básicamente el caudal Q , que no cambia por el hecho de extraer material aluvial del fondo. En la búsqueda del equilibrio bajo las nuevas condiciones (reducción del suministro de sedimento), el río reduce gradualmente la pendiente para ajustarse a una menor disponibilidad de material sólido. Este razonamiento lo expresa matemáticamente la relación anterior entre las variables que controlan el equilibrio fluvial: el lado derecho de la igualdad (el que incluye la pendiente) debe reducirse para mantener la relación cuando el suministro, en el lado izquierdo, disminuye. Es precisamente esta reducción de la pendiente la que causa la incisión. La reducción de la pendiente (y pues la incisión) se origina en el tramo del que se extrae el material y progresa de forma gradual hacia aguas abajo mientras el lecho se profundiza. Es el mismo proceso que ocurre cuando se limita la disponibilidad de sedimento aguas abajo, por ejemplo, por la construcción de muros.

En teoría, toda la red fluvial aguas abajo “siente” la reducción del suministro. En consecuencia, toda ella debería incidirse. En realidad, la incisión se difunde o se amortigua, con la distancia aguas abajo. Esto ocurre porque a medida que nos alejamos del lugar de dónde se extrae material, el peso relativo en el suministro de otras fuentes de sedimento situadas aguas abajo de la extracción (p.e. otros afluentes, sedimento de márgenes, el propio lecho, desprendimientos, etc.) es mayor, haciendo que se reduzca la importancia relativa que el volumen de material extraído supone para el conjunto de la disponibilidad. Es por este motivo

por el que antes se ha descrito que el perfil longitudinal “rota” o “gira” alrededor de un punto lejano, no afectado por la incisión.

La extensión de la incisión por la red fluvial es pertinente en el caso del Bernesga. Si la aportación sólida del Bernesga al Esla supone una parte significativa del suministro sólido total al Esla en la confluencia, el Esla puede incidirse y a su vez condicionar la evolución del perfil del Bernesga. En este caso, la condición de contorno del extremo aguas abajo del Bernesga, es decir la cota del cauce del Esla en la confluencia, no es una variable independiente, sino que está ligada a la evolución del propio Bernesga. Sólo si la aportación de sedimento procedente del Esla aguas arriba de la confluencia fuera muy superior a la aportación del Bernesga, la cota del Esla sería realmente independiente de la incisión del Bernesga. Las mismas consideraciones pueden hacerse con el Torío. Ambos ríos, Bernesga y Torío, tienen una cuenca de dimensiones similares en la confluencia (Figura 2). En estas condiciones, cabe suponer que la aportación sólida de ambos ríos antes de que empezaran las grandes acciones de canalización y de extracción fuera similar. La magnitud similar de ambos ríos se aprecia bien en la distribución longitudinal de la anchura media en 1956, aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío: la anchura del Bernesga aproximadamente se duplica después de recibir el Torío, ver §13.

Si del Torío también se ha extraído material, como así ha sido, estas extracciones suponen a su vez una reducción de la disponibilidad de sedimento para el Bernesga que se va a incidir como si las extracciones en el Torío se hubieran llevado a cabo en el Bernesga. Es decir, en un punto el Bernesga va a sentir que el Torío no le trae tanto material aluvial como le traía y este déficit para la reunión de los dos ríos y de ahí hacia aguas abajo implica una incisión.

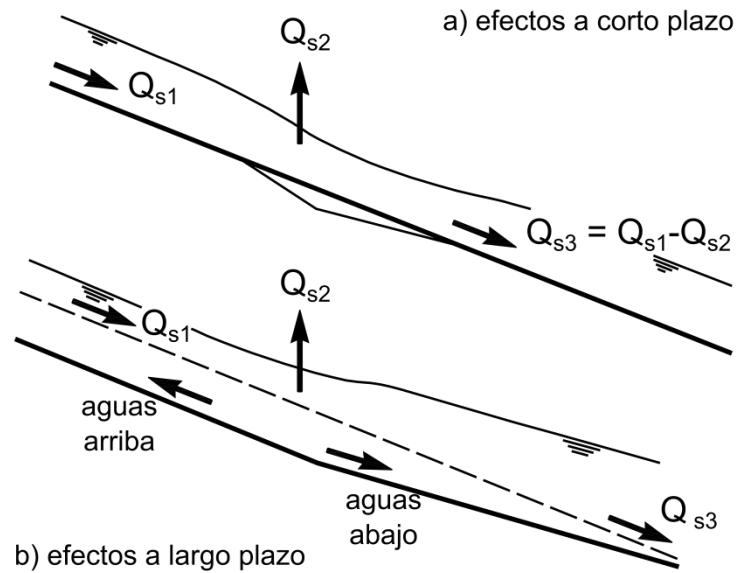


Figura 67. Diagrama de los efectos que las extracciones de material tienen sobre el perfil
(Ferrer-Boix, 2011)

Hemos visto el por qué el cauce se incide aguas abajo de la extracción. Pero ¿cuál es el efecto de la extracción de material aluvial hacia aguas arriba? A corto plazo y si hay continuidad del lecho, es decir, si no existen puntos fijos que hagan independiente la evolución de ambos tramos, superior e inferior, ver §10.3, la incisión en la zona de extracción representa, para el tramo aguas arriba, un descenso de la cota de su extremo inferior. Esta diferencia de cota entre el tramo superior, todavía no afectado por la incisión, y el área donde se lleva a cabo la extracción supone una pendiente mayor que la inicial en equilibrio. Si el resto de variables que controlan el equilibrio se mantienen sin cambios, esta pendiente mayor debe reducirse. La reducción de la pendiente del perfil longitudinal, que arranca del punto de extracción hacia aguas arriba, significa que la incisión, que al comenzar la extracción sólo afectaba al área de la que se extraía material, empieza a afectar de forma gradual a tramos cada vez más alejados. Se trata pues de una erosión regresiva (o *remontante*) que de forma gradual puede abarcar distancias de varios kilómetros. A largo plazo se puede esperar que, de nuevo si el caudal líquido y la disponibilidad de sedimento no cambian, el perfil longitudinal del río sea paralelo al inicial. La diferencia de cota entre ambos perfiles es precisamente la incisión ocasionada por la reducción del suministro de sedimento hacia aguas abajo que representa la extracción de

material. La Figura 67 representa un esquema simplificado de los efectos de las extracciones hacia aguas arriba y hacia aguas abajo tanto a corto como a largo plazo.

14.4 Descripción de la incisión en el Bernesga

La incisión registrada en el Bernesga no es uniforme (Figura 59): el tramo del Bernesga a su paso por León y los tramos aguas abajo de la Ciudad concentran las mayores erosiones.

Se ha calculado la incisión media por tramos. Para ello, los perfiles longitudinales completos de 1995 (excepto en el tramo entre los puentes de San Marcos y de la N-630, que resultan anómalos), de 2009 y de 2017 se han dividido por tramos. Los datos del perfil longitudinal en cada tramo han sido interpolados por rectas o por ecuaciones de tipo potencial como en el caso del perfil longitudinal prístino. La cota media del lecho en cada tramo se ha obtenido integrando la ecuación que describe el perfil longitudinal y después de dividir por la longitud del tramo. De este modo, la incisión media por tramos se obtiene restando las cotas medias del lecho en cada tramo respecto de la cota media del tramo del perfil prístino. A los datos anteriores hemos añadido los perfiles longitudinales que llamamos de 1966 (en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones) y de 1976 (último tramo de la canalización, aguas abajo de la confluencia con el Torío). El perfil que llamamos de 1966 resulta de aglutinar los datos de 1964 y 1968, mientras que el que llamamos de 1976 se obtiene de agrupar los perfiles longitudinales de 1975 y 1977. La excepción a esta metodología sucede en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones, donde, como se ha dicho más arriba, se han tomado los datos de 1910 como correspondientes al perfil prístino, seguido de los 4 datos de 1925 de los mapas topográficos de 1912-25 en la ciudad de León, y posteriormente por los perfiles de 1966, 2009 y 2017.

División por tramos



Figura 68. Azud Sariegos, pequeña obra civil con un suplemento móvil (desmontable). Fotos 1-X-2018 a la izquierda (con suplemento) y 25-X-2018 a la derecha sin él.

Tabla 16. Incisión media por tramos en cada instante de tiempo respecto al perfil inicial de 1910-1933. La traviesa 35 es la última traviesa de la canalización finalizada en 1983, y está situada 133 m aguas arriba del vado demolido en 2014. (*) Los resultados del tramo 4 entre los azudes de San Marcos y de la central hidroeléctrica (c.h.) se han calculado tomando como perfil inicial el del proyecto de canalización de 1910 y para la cifra de incisión de 1925 unos pocos datos del perfil 1912-25, de hecho situados fuera del tramo en cuestión entre azudes; los datos de 1966⁺ están limitados a este tramo, no existen en otros. (^) Los datos de 1976⁺ están limitados al subtramo desde la traviesa 35 al puente LE-630, es decir no se extienden a todo el tramo 3 hasta la c.h. (+) Los datos de 1995 son anómalos entre el puente de la N-630 y el azud c.h.; por eso no se da cifra en los tramos 3 y 4. (++) Se aglutinan los datos 1964-68 en 1966 y 1975-77 en 1976. Valores negativos (positivos) indican incisión (crecimiento).

tramo	extremo inf.	extremo sup.	coord.	coord.	L	Δz (m)					
			inicial (m)	final (m)		1925	1966 ⁺⁺	1976 ⁺⁺	1995	2009	2017
T-1	desembocadura	puente Alija	0	6,171	6,171	-	-	-3.7	-4.8	-6.9	
T-2	puente Alija	vado	6,171	10,549	4,378	-	-	-5.2	-7.2	-8.7	
T3	traviesa 35	azud c.h.	10,681	15,541	4,860	-	-5.2 [^]	-6.1 ⁺	-7.1	-8.1	
T-4*	azud c.h.	azud s. Marcos	15,541	16,265	723	-2.0	-4.2	-	- ⁺	-6.6	-4.5
T5	azud S. Marcos	azud Sariegos	16,265	21,657	5,392	-	-	-2.9	-4.7	-4.5	
T6	azud Sariegos	inicio tramo	21,567	29,204	7,547	-	-	1.2	0.2	0.1	

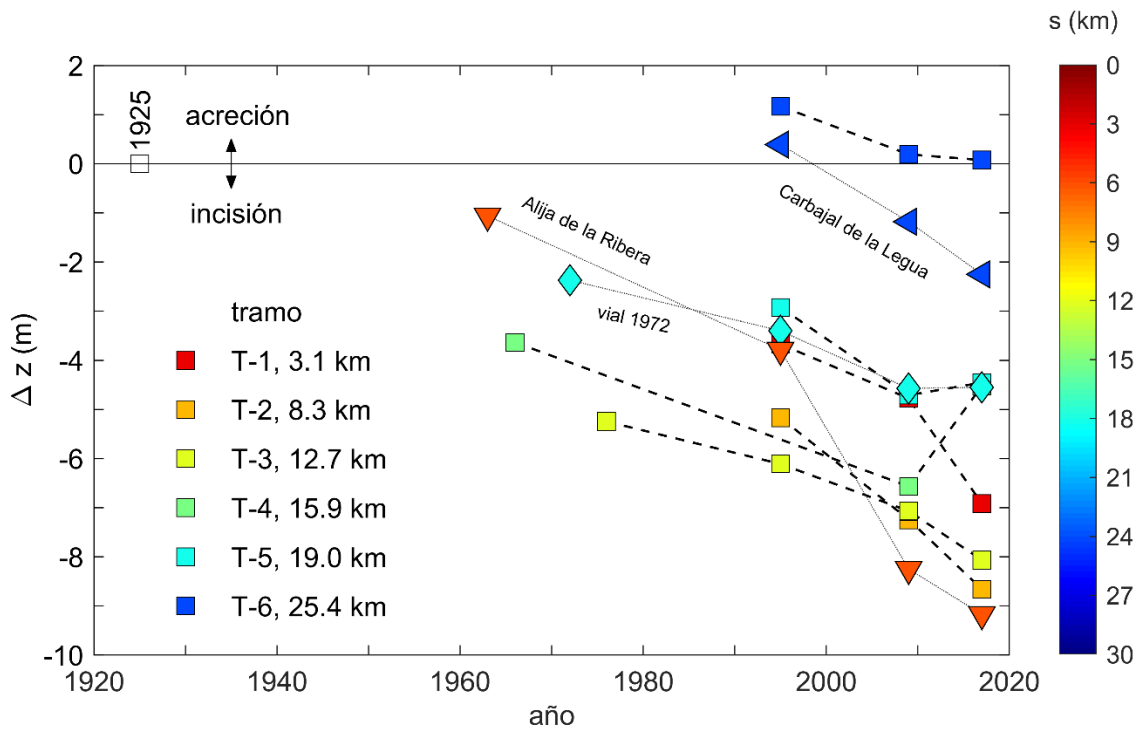


Figura 69. Cambio de cota respecto al perfil longitudinal prístino obtenido de la agrupación de los datos de 1910, 1912-25 y 1933. Valores negativos indican incisión y positivos crecimiento. La ordenada cero significa el perfil prístino. Los cuadrados denotan la incisión media por tramos (T1...T6 de la Tabla 16, allí se anota la longitud del tramo, mientras que aquí se anota la coordenada del punto medio del tramo, en la leyenda) y los triángulos azules, naranjas y rombos marrones indican la erosión en puntos concretos del perfil, que es información complementaria de gran valor: el puente de Carbajal de la Legua, el puente de Alija de la Ribera y puente del proyecto de vial de 1972, este último situado unos 825 m aguas arriba del puente de San Marcos. En estos tres puntos se toma el tálweg de la sección. El color de los marcadores indica la posición de los puentes y del centro de los tramos (T) según la barra colores de la derecha. La evolución de las secciones en estos dos puentes se muestra en la Figura 71 y Figura 72, respectivamente. El Anejo E muestra una serie de fotografías recientes de la evolución del Puente de Alija de la Ribera. El anejo G contiene las coordenadas de estas dos secciones transversales.

La Tabla 16 resume los valores promedio de la incisión en cada uno de los seis tramos en los que se han dividido los 30 km de río. Los resultados de la tabla, representados gráficamente en la Figura 69, ilustran el cambio de cota medio del lecho en cada instante en relación a la cota del perfil longitudinal prístino (ordenada nula). Es destacable que la magnitud de la incisión media en algún tramo (de longitud kilométrica) supera los 8 m. Los resultados de la Tabla 16 indican que la incisión en el Bernesga no se ha detenido en ningún tramo, tampoco en los tramos urbanos con traviesas (tramo 3 en la Tabla 16, Figura 61). Destaca también en la tabla la incisión, comparativamente menor, en los tramos inferior (tramo 1) y sobre todo superior (tramo 6). Como se verá más adelante, estas menores erosiones son debidas, por un lado al efecto de la cota del tálveg en la confluencia Esla-Bernesga (tramo 1) y por otro a un proceso de erosión regresiva en curso que está afectando al tramo superior (tramo 6). Integrados a lo largo de la longitud del cauce y considerando una anchura del cauce de 30 m, el Bernesga en sus últimos 30 km ha perdido aproximadamente 4.4 millones m^3 desde 1910. Hacemos notar que este volumen también incluye el material del lecho excavado durante las distintas fases de la canalización del Bernesga. No obstante, esta cantidad es mucho mayor que los 1.1 millones m^3 (Tabla 8), que era la suma de excavaciones de obras y extracciones de material aluvial. En otras palabras, el volumen del hueco que ha dejado la incisión (4.4 m^3) es mucho mayor que lo que se ha sacado del río, incluso si los volúmenes extraídos realmente (clandestinos además de legales) fueran mayores que los conocidos (legales). Esta conclusión apunta a otro caso de autoincisión, ya observado en el caso del río Gállego (UPC, 2005, Martín-Vide et al, 2010)

En la Tabla 16 y Figura 69 son destacables dos aspectos más. El proceso de incisión no se ha parado en el s.XXI, sino que al contrario parece incluso haberse acelerado (ver la tendencia de 2009 a 2017) y esto a pesar de que las principales canalizaciones estaban acabadas en 1983 (Tabla 6) y a pesar de que las extracciones después del año 2000 son mínimas (Tabla 8). En segundo lugar, el proceso no se ha parado a pesar de que la incisión ha interesado tramos del lecho en roca (por ejemplo Figura 11), es decir el afloramiento de la roca (arcillosa) no detiene la incisión. Ambas observaciones no dejan de ser dramáticas para el futuro del río Bernesga.

Tabla 17. Pendiente media por tramos en cada instante de tiempo. (*) La pendiente del tramo 4 entre la central hidroeléctrica (c.h.) y el azud de San Marcos durante los periodos 1910-33 y 1925 se han calculado con los datos del perfil inicial de 1910 (no existía ninguno de los dos azudes, obviamente) y los mapas topográficos de en la Ciudad de León (de 1925), respectivamente.

tramo	extremo inf.	extremo sup.	coord.	coord.	L	pendiente media (m/m)							
			inicial	final		1910-33	1925	1966	1976	1995	2009	2017	
			(m)	(m)	(m)								
T-1	desembocadura	punto Alija	0	6,171	6,171	0.0028					0.0025	0.0018	0.0019
T-2	punto Alija	vado	6,171	10,549	4,378	0.0034					0.0030	0.0026	0.0022
T-3	travesía 35	azud c.h.	10,681	15,541	4,860	0.0036				0.0034	0.0038	0.0035	0.0035
T-4	azud c.h.	azud S. Marcos	15,541	16,265	723	0.0051(*)	0.0044(*)	0.0033				0.0061	0.0032
T-5	azud S. Marcos	azud Sariegos	16,265	21,657	5,392	0.0038					0.0045	0.0036	0.0042
T-6	azud Sariegos	inicio tramo	21,567	29,204	7,547	0.0040					0.0045	0.0049	0.0049

Los perfiles longitudinales interpolados nos permiten calcular, por su parte, la evolución temporal de las pendientes medias de cada tramo (Tabla 17). Parece significativo que las pendientes prístinas son mayores que las modernas aguas abajo de San Marcos, lo que se explicaría por efecto de la incisión en esa mitad inferior del dominio. Justo al revés, las pendientes prístinas son menores que las modernas en la mitad superior del dominio, lo que se explicaría por la erosión remontante. Un esquema simplificado de este comportamiento se da en la Figura 70.

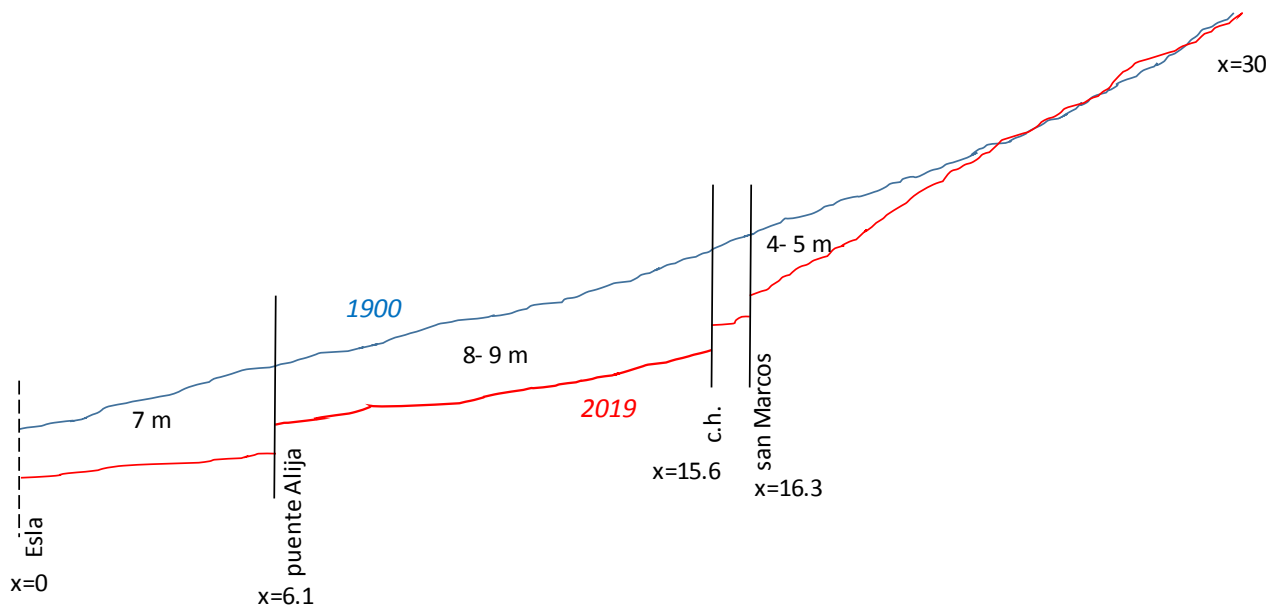


Figura 70. Esquema simplificado de la incisión del Bernesga, para explicar el cambio de pendiente. Está inspirado en la Figura 59 y en las Tabla 16 y la Tabla 17, pero la vertical está muy exagerada para ganar claridad. Se señalan las tres interrupciones más importantes del perfil.

Es interesante que la pendiente señalada (*) es muy semejante al de la primera canalización acabada en 1911 (Tabla 6). También las pendientes proyectadas en otras canalizaciones son parecidas a las alcanzadas por el río.

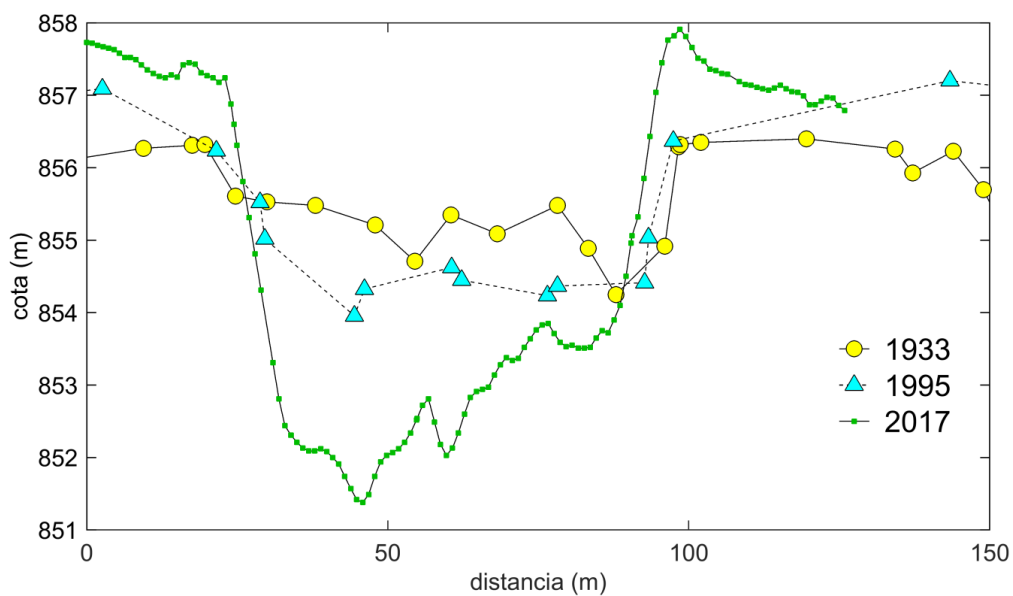


Figura 71. Evolución temporal de la sección del Bernesga en el puente de Carbajal de la Legua. Las cifra de erosión por el tálveg de esta figura se han presentado en el resumen de incisión por tramos en la Figura 69.

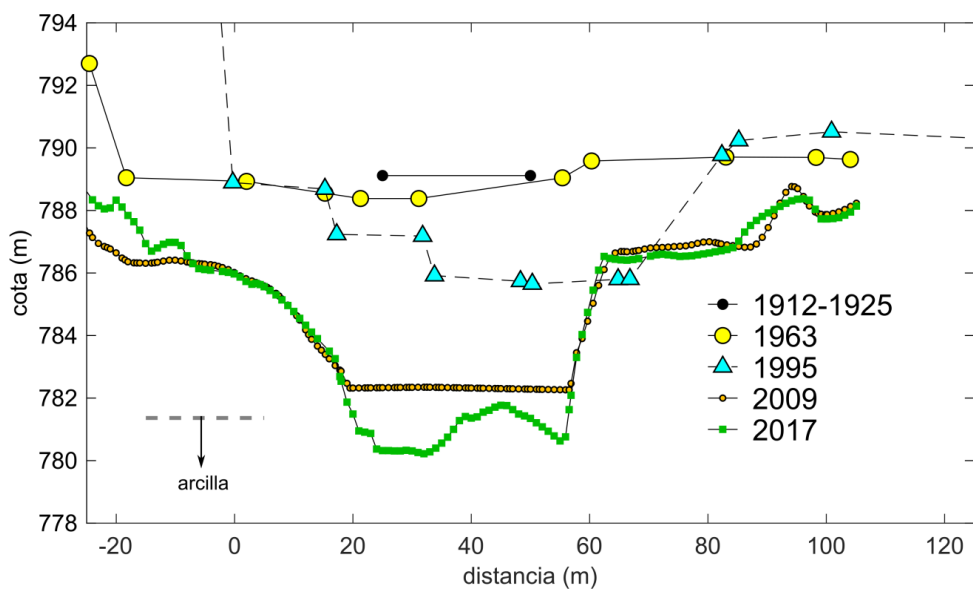


Figura 72. Evolución temporal de la sección del Bernesga en el puente de Alija de la Ribera. Las cifra de erosión por el tálveg de esta figura se han presentado en el resumen de incisión por tramos en la Figura 69.

A continuación, se describen y se explican los procesos de incisión sufridos por cada uno de los tramos del Bernesga.

Tramo puente de San Marcos-puente de los Leones

a) hasta 1925

El primer tramo de río donde se detecta una incisión es el tramo entre los puentes de San Marcos y el de los Leones. Recordemos que este tramo fue canalizado en 1911, resultando una anchura después de la canalización de 133 m, ver §10.1. En promedio, se estima que esta canalización supuso una reducción de la anchura del cauce de unos 40 m. Así, la anchura inicial del Bernesga en esta zona antes de la canalización podría ser superior a los 175 m (en las secciones transversales del proyecto no se aprecia, sin embargo, el límite del cauce por la margen derecha, con lo que la anchura inicial antes de las obras podría ser mayor). Entre 1910 y 1925, la incisión registrada es, en promedio, de 2 m (Tabla 16). Esta incisión es solo atribuible a la canalización de 1911 pues en 1925 no habían empezado las extracciones de material, ver §10.4. En ese momento todavía no habían dado comienzo las importantes migraciones desde el entorno rural al urbano de la mitad del siglo XX con el consiguiente abandono de cultivos y sus efectos sobre la disponibilidad de sedimento, ver §11. El Bernesga en 1911 presentaba una morfología de cauce trenzado, que ya había sido descrita por Pérez de los Cobos (1908), sin impactos significativos, muy parecida a la que se aprecia en la fotografía aérea de 1956, sobre todo en los tramos más alejados de la Ciudad de León.

De este modo, toda la incisión entre estas dos fechas, 1910 y 1925, es causada por la reducción de la anchura del cauce. Por tanto, vale la pena intentar comparar la cifra observada con la calculada. Para el cálculo de la erosión por contracción entre 1910 y 1925 a largo plazo se utiliza la expresión anterior en la que se consideran las siguientes variables: 1) el exponente de la ecuación es 0.86 (en lugar de 0.67), valor considerado habitual en ríos de grava, 2) caudal dominante $Q = 162 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal dominante, ver §9.1), 3) pendiente del cauce $S = 0.00508 \text{ m/m}$ (Tabla 17), 4) diámetro característico del lecho $D_{50} = 17.2 \text{ mm}$ (media de las 3 granulometrías situadas más aguas arriba, en el tramo no afectado por la incisión, ver §8). Con estos valores se obtiene un calado normal $y_{n0} = 0.49 \text{ m}$, lo que conduce a una erosión de tan solo 0.13 m. Este

valor queda muy lejos de los 2 m de erosión observados. Como se ha dicho, las secciones transversales del proyecto de 1910 no permiten ver el límite del cauce por la margen derecha. Entonces, si en lugar de tomar como anchura inicial la estimada (175 m) y que podría ser inferior a la real en 1910, se toma la anchura media del cauce del tramo más alejados de León en 1956, igual a 233 m (asumiendo que este tramo, situado 7.5 km aguas arriba del puente de San Marcos, no se ha visto afectado por la canalización), se obtiene una erosión por estrechamiento de 0.26 m, aún lejos de la incisión observada. Un aspecto que podría contribuir a incrementar la erosión por contracción es el caudal líquido. Para el cálculo anterior se ha considerado el caudal asociado a la máxima crecida ordinaria. Este caudal se puede asimilar al caudal dominante o formativo, responsable de las dimensiones del cauce: anchura, profundidad y pendiente. Este caudal es formativo precisamente porque ocurre de forma relativamente frecuente (una o algunas veces al año). Por supuesto, caudales más elevados que el dominante producen erosiones mayores: por ejemplo, si $Q = 393 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a 100 años de periodo de retorno (Santillán y Anta, 2013), la erosión resultante en igualdad de condiciones es de 0.39 m. A largo plazo, es decir después de la sucesión de avenidas ordinarias (próximas al caudal dominante), el lecho del río tendería a recuperarse de esta erosión mayor causada por un evento extraordinario. Sin embargo, los 14 años entre 1911 (final de las obras) y 1925 no nos parece tiempo suficiente como para pensar que el río pudiera haber alcanzado el equilibrio de nuevo en 1925 si algún evento extremo hubiera ocurrido durante esos años. Es decir, creemos que el río no habría tenido tiempo de alcanzar el equilibrio y el lecho en 1925 todavía seguiría mostrando la huella del evento extraordinario (en forma de una erosión mayor que los 0.26 m). En cualquier caso, los 0.39 m resultantes continúan estando muy por debajo de la erosión media registrada.

El mismo razonamiento de un tiempo corto (14 años) respecto a la noción de “largo plazo”, para la que es válida la fórmula de erosión, debe relativizar la comparación entre el dato de 2 m y el cálculo.

El hecho de que la erosión por contracción asociada a una avenida de 100 años de periodo de retorno sea todavía muy inferior a la incisión observada nos hace pensar si no hay otras causas

que pudieran estar incrementando la incisión. En este sentido, los espigones construidos, parte también del proyecto de canalización y finalizados en 1917, podrían ser los responsables de la erosión que falta por explicar. El proyecto inicial incorporaba una serie de espigones que dejaban un cauce central de entre 50 m y 30 m según las fuentes disponibles (Figura 31 y Figura 36). Anchuras efectivas de este orden explicarían entre 1.1 m y 1.9 m de los 2 m de incisión sufrida por el río en este tramo entre 1911 y 1925. En avenida, el agua puede sumergir los espigones haciendo que la anchura efectiva para el cálculo de la erosión por contracción quizás sea mayor que la anchura central que dejan los espigones de ambos márgenes. Esta consideración redundaría en incisiones por contracción menores que las estimadas (entre 1.1 m y 1.9 m). La anchura actual del cauce susceptible de transportar sedimento, llamémosla anchura efectiva, es de unos 30 m aproximadamente.

La erosión por estrechamiento se limita al tramo contraído. Sin embargo, por continuidad del lecho y por la inestabilidad del perfil longitudinal cuando hay cambios bruscos de cota, puede pensarse que en los extremos del tramo que sufre el estrechamiento se dan sendas zonas de transición donde el perfil longitudinal adquiere una pendiente distinta: menor que la de equilibrio en el extremo inferior y mayor en el extremo superior. Esto hace que la zona incidida pueda ser en realidad mayor que la que se limita al tramo estrecho. Aplicando este razonamiento al Bernesga, podemos pensar que los tramos aguas abajo del puente de los Leones y aguas arriba del puente de San Marcos pudieron ya estar sufriendo incisión antes incluso que en ellos se realizaran obras de canalización.

También hay que tener presente el efecto de las excavaciones: el primer proyecto de canalización contemplaba una excavación de $64,000 \text{ m}^3$, ver §10.4. La disminución teórica de la cota media del cauce que este dragado produciría en el río se obtiene dividiendo este volumen por el área afectada (95 ha), resultando 0.67 m. Este valor es menor que la incisión observada y menor también que las estimaciones de la erosión que resultan de considerar la distancia entre espigones como la anchura efectiva del cauce. Esto significa que o bien se extrajo más material del que consta el proyecto o bien la anchura efectiva para el cálculo es parecida a la distancia entre espigones.

Esta última hipótesis es la más atractiva y permitiría decir en conclusión que el río Bernesga sufrió una erosión general del orden 2 m, de los cuales el estrechamiento con muros y sobre todo con espigones explicaría de 1.1 a 1.9 m en 14 años, proceso que no obstante requiere más tiempo (“largo plazo” y no sólo 14 años) para desarrollarse. El descenso forzado por la excavación (0.67 m) no se ha de sumar, sino que quedará incluido en la erosión, pero sí puede acelerar la erosión.

Por último, también habría que considerar los efectos (incisión) que los muros de canalización pudieran haber tenido en la disminución de la disponibilidad.

b) desde 1925 a 1966

Entre 1925 y 1966 (correspondiente esta última fecha a los datos agrupados de 1964 y 1968) el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones desciende 2.2 m en promedio (), siendo pues la incisión total en este tramo desde 1910 de 4.2 m. Para explicar esta cifra debemos considerar, en primer lugar, que la misma causa de la erosión de 2 m en 1911-25 sigue actuando 40 años más, lo que ya parece un “largo plazo”, de manera que 1.1—1.9 m por estrechamiento es ahora más creíble. Pero además, hay que atender a otras causas nuevas.

En 1966 no se ha terminado la segunda fase de la canalización del tramo inferior (entre los puentes de los Leones y de la N-630), finalizado en 1968, (Tabla 6). Sin embargo, las fotografías aéreas del ejército muestran que en 1959 las obras ya estaban bastante avanzadas (Figura 38 y Figura 42). En una fotografía de 1966 (Figura 46) se aprecia el estado de las obras de la segunda etapa de la canalización del tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones. A la incisión registrada entre los puentes de San Marcos y de los Leones durante el periodo 1925-1966 podría haber contribuido el efecto de la erosión regresiva (hacia aguas arriba) de la canalización entre los puentes de los Leones y de la N-630, situado inmediatamente aguas abajo del tramo en cuestión (recordemos que el azud al pie del puente de los Leones, actualmente la central hidroeléctrica, fue proyectado en 1968). Esta canalización impuso una anchura de 76 m. Por sí sola, esta canalización produciría, a largo plazo (tomando el caudal dominante como el causante de los cambios) una erosión por contracción de 0.84 m (paso de 233 m, anchura del cauce prístino a 76 m, Tabla 6, siendo la pendiente del cauce inicial es

0.0036 m/m, Tabla 17). Sin embargo, si se toma como anchura final la distancia entre espigones transversales (entre 40 – 50 m, Figura 47), la incisión alcanza 1.65 m. Esta erosión del tramo siguiente no se debe sumar a la de 1.1–1.9 m del tramo que estamos estudiando. En la realidad, las dos erosiones se combinarían como formándose una envolvente de las dos, pues se trata de la misma causa (con efectos parecidos: 1.65 m frente a 1.1–1.9 m) que ahora se extiende a una distancia mayor. Tratamos de ilustrar esta explicación en la Figura 73.

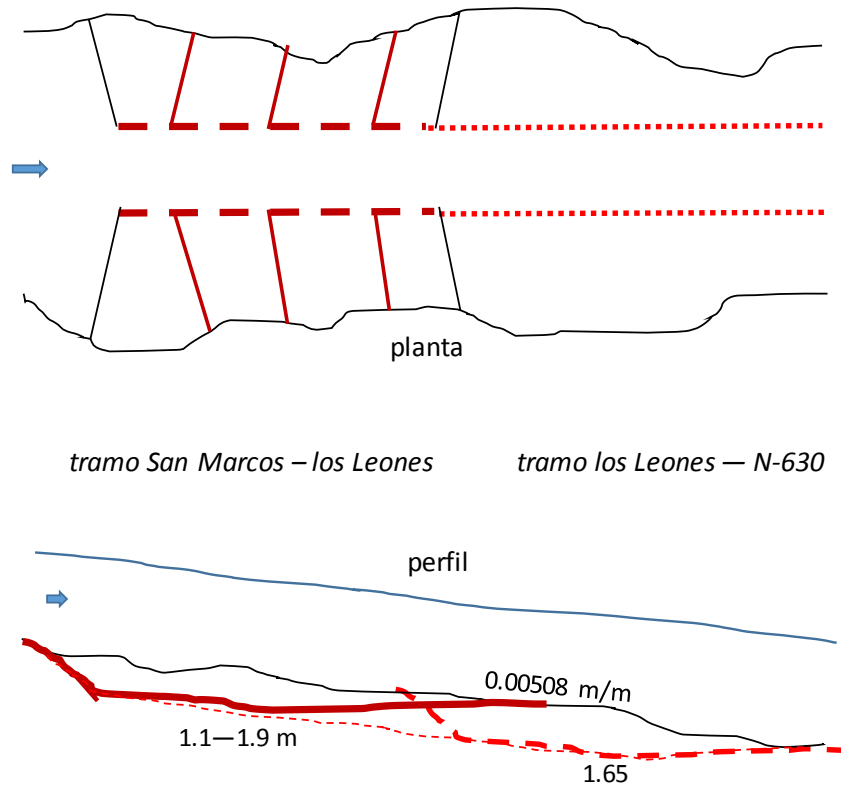


Figura 73. Después de estrechado el tramo superior con espigones (1911) (color marrón), esquema de la consecuencia de estrechar el inferior (1968) (color rojo), de la misma anchura inicial.

Por otro lado, la segunda fase de la canalización finalizada en 1968 (tramo aguas abajo del puente de los Leones) supuso una reducción de la longitud del cauce de 128 m entre 1956 y 1977 (Tabla 7). Esta reducción, que apenas representa un 6% de la longitud en 1956, llevaría asociada una erosión a largo plazo (alcanzada después de que el río haya recuperado el equilibrio) de 0.50 m (la pendiente del tramo obtenida del perfil prístino es 0.0036 m/m, Tabla

17). Como por entonces no se había construido el azud aguas abajo del puente de Leones (proyectado en 1968), es muy probable que el tramo superior y objeto de análisis de este apartado, ya hubiera notado el efecto (o una parte, al menos) de esta reducción de longitud. Así, la erosión por acortamiento sí que habría que sumarla a la erosión por contracción, a diferencia de la erosión por estrechamiento. Si esta erosión se hubiera desarrollado por completo, la erosión en 1966 en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones estaría en un intervalo entre 1.6 m y 2.4 m (1.1 m – 0.9 m del apartado anterior + 0.5 m). Estas estimaciones son inferiores a la mitad de la incisión registrada (e igual a 4.2 m, Tabla 16), con lo que creemos que los volúmenes de material extraído, tanto aguas abajo como en el propio tramo pudieron ser mucho mayores que los consignados en los proyectos.

En 1970 se termina el segundo estrechamiento entre los puentes de San Marcos y de los Leones que reduce la anchura de 133 m a 76 m (Tabla 6). Esta reducción podría ya haberse ejecutado entre 1964 y 1968, fechas de los perfiles longitudinales asociados a 1966. De hecho, en una fotografía de 1966 (Figura 47) ya se aprecian los dos muros laterales de esta segunda canalización así como gran movimiento de tierras. Según el proyecto, esta fase de canalización incluyó el dragado de 50,000 m³ de material del lecho, ver §10.4. Pensamos que esta excavación, que supondría por sí misma una erosión de 1 m (ocupa un área de 51 ha) podría haber contribuido a incrementar las estimaciones anteriores de la incisión (entre 1.6 y 2.4 m).

En conclusión 4.2 m es difícil de explicar únicamente por las canalizaciones.

Aguas arriba y cerca del puente de San Marcos

En este momento es pertinente analizar la incisión de un punto situado 825 m aguas arriba del puente de San Marcos. Se trata de una sección donde en un estudio de 1972, se proyectaba la construcción de un puente (puente vial 1972, Figura 69). La primera intervención directa en este tramo es de 2002, cuando se realizan las obras de adecuación del cauce desde el puente de San Marcos hasta el puente de la calle Luis Pastrana (Tabla 6, Figura 62). Sin embargo, ya en 1972 este punto ha sufrido una incisión superior a 2.3 m. Esta incisión es atribuible al efecto regresivo (hacia aguas arriba) de las obras de canalización (reducción de anchura y de la longitud del cauce y extracción de material del lecho) de los tramos aguas abajo, especialmente

del sector entre los puentes de San Marcos y de los Leones. Si hubiera habido extracciones de material aguas arriba del punto donde se proyecta el puente, el tálveg en ese punto podría también haber descendido a causa de estas extracciones.

En la coordenada donde se proyecta el puente también se aprecia cómo la magnitud de la erosión se amortigua con la distancia: mientras que la incisión en 1966 en el tramo encauzado supera los 4 m, esta erosión no alcanza los 2.5 m, en 1972, en un punto situado 825 m aguas arriba. Estos registros demuestran que la incisión requiere de un cierto tiempo para propagarse y afectar a tramos situados aguas arriba. Este tiempo es función del régimen de caudales: es en crecida cuando existe transporte de fondo en ríos y son pues las crecidas las responsables de producir cambios morfológicos. Por último, hay que tener presente que la construcción del azud de San Marcos entre 1964 y 1977 (Figura 52) impide que las acciones y efectos aguas abajo progresen hacia aguas arriba. Por tanto, toda la incisión del tramo superior al azud de San Marcos obedece o bien a acciones previas a su construcción que progresan hacia aguas arriba o bien a actuaciones llevadas a cabo en el propio tramo con posterioridad.

Los datos de 1995 del perfil longitudinal en este tramo no son suficientes como para interpolar un perfil longitudinal que describa los datos y poder así calcular el progreso de la incisión entre 1966 y 1995. Los pocos datos sin embargo se sitúan alrededor del perfil longitudinal de 1966 con lo que parecería que la incisión podría haberse frenado durante este periodo. A esto ha contribuido sin duda la construcción del azud al pie del puente de Leones, que impide que la incisión de los tramos inferiores progrese hacia aguas arriba. El hecho de que las cotas de 1995 y 1966 coincidan, nos hace pensar que el azud fue construido más cerca de 1968 (fecha de proyecto) que de 1977 (fecha en que es visible en fotografía aérea).

El siguiente dato, de 2009, revela un aumento de la incisión hasta los 7.1 m (casi 3 m más que en 1966). El último dato, de 2017, indica que la incisión ha disminuido hasta los 4.5 m, es decir que entre 2009 y 2017 el tálveg ha experimentado un crecimiento medio de 1.9 m. Esta diferencia de cota representa un volumen de sedimento neto (sin tener en cuenta los poros) de 28,000 m³ (siendo aproximadamente 30 m la anchura actual del cauce donde se pueden producir cambios de cota del fondo). La central hidroeléctrica se construye en 2006. De

conversaciones con el personal técnico de la Confederación, sabemos que unas compuertas fueron instaladas en el azud alrededor de 2010. Paralelamente, el azud de San Marcos fue parcialmente demolido entre julio y octubre de 2013.

El perfil longitudinal de 2009 no muestra de forma clara una acumulación de material aguas arriba del azud de la central, como sí se aprecia en 2017. Sí que en el perfil de 2009 se observa una acumulación de material aguas arriba del azud de San Marcos (Figura 61). Los datos del perfil de 2017 en esta última zona se superponen con los de 2009. Tomando la cota del tálveg como representativa del sector aguas arriba del puente de San Marcos, esto significaría que este tramo no se ha erosionado después de su demolición parcial en 2013. A ello contribuye sin duda la solera del azud que se ha mantenido como elemento de protección de la cimentación del puente de San Marcos (Santillán y Anta, 2013).

Respecto al tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones, considerando las cotas del perfil longitudinal de 2009 por fiables, no sabemos por un lado: 1) por qué la incisión, aparentemente detenida en 1995, prosigue entre 1995 y 2009 y 2) el porqué de la acumulación de material entre 2009 y 2017. Pensamos que ambos procesos tienen que ver con las obras de la central y un posible recrecimiento del azud para el aprovechamiento hidroeléctrico. El azud proyectado en 1968 tenía una altura sobre el lecho de ~ 2.5 m. Esta altura no es un obstáculo insalvable para el transporte de fondo: el sedimento puede acumularse de forma transitoria aguas arriba del azud pero ser evacuado hacia aguas abajo en crecidas. Sin embargo, según los datos geométricos contenidos en el modelo hidráulico, la diferencia de cota entre la coronación actual del azud y la sección transversal inmediatamente aguas abajo (a una distancia de 55 m) es de 5.74 m. Una altura del azud de dimensiones similares es la que se aprecia en el campo (Figura 4). Este resultado demuestra que el azud se ha recrecido. Pensamos que esta altura sí que inicialmente impide el paso de sedimento hacia aguas abajo. A medida que el vaso de azud se llena de sedimento, la estructura deja paulatinamente de ejercer como una barrera infranqueable para el transporte sólido. Así, creemos que la acumulación de material aguas arriba del azud de la central hidroeléctrica se ha producido por la incapacidad del sedimento transportado por el fondo del cauce de superar el obstáculo que representa el azud recrecido

después de 2006. Por consiguiente, puede esperarse, durante el periodo transitorio en que se llena el vaso del azud, un déficit en la alimentación de sedimento hacia los tramos inferiores a la central. Como en otros casos anteriores, esta reducción de la alimentación podría intensificar la incisión de estos tramos, ver apartado siguiente.

Tramo puente de los Leones-confluencia con el Torío

a) de 1910 a 1995

Este tramo comprende las fases 2 y 4 de las canalizaciones del Bernesga: desde el puente de los Leones al puente de la N-630 (fase 2, terminada en 1968) y de ahí a la confluencia con el Torío (fase 4, finalizada en 1973, Tabla 16).

La incisión media entre 1910 y 1995 en este tramo supera los 6 m (Tabla 16). No hay datos entre estas dos fechas entre el puente de los Leones y el de la carretera N-630 ni de éste a la confluencia con el Torío. El estrechamiento del cauce asociado a las canalizaciones supondría, a largo plazo, una erosión de 0.84 m (reducción de la anchura de 233 m a 76 m, siendo la pendiente inicial 0.0036 m/m, Tabla 17). Por otro lado, obras de canalización entre el puente de la carretera N-630 y la confluencia con el Torío destacan por los 327,000 m³ de sedimento que según el proyecto fueron excavados para su ejecución (Tabla 6). Esta actuación, que incluye también el último tramo del Torío, de 1.5 km de longitud, abarca una superficie de 27.4 ha. La erosión del lecho que se derivaría solo de la excavación alcanza entonces los 1.2 m. Ambas cifras de incisión, que recordemos no son acumulables, son muy inferiores a la incisión observada entre 1910 y 1995. Como en los tramos superiores, mayores erosiones se obtendrían si la anchura final efectiva no es la distancia entre muros sino la anchura del cauce central, de entre 50 m y 40 m (entre 1.4 m y 1.9 m, respectivamente). A la mayor de estas cifras habría que sumar los efectos que sobre este tramo podrían haber causado las obras en el tramo superior contiguo (la transición entre un tramo estrecho –aguas arriba del puente de los Leones- y otro no –aguas abajo del puente) como una pérdida de disponibilidad de material. Todo lo anterior es cierto si como parece en los planos de los proyectos y en las fotografías que se han conseguido, las traviesas existentes en el tramo en cuestión (Figura 61) se construyeron en una segunda fase, quizás al tiempo que se ejecutaban las obras de la canalización aguas

abajo de la confluencia con el Torío (finalizado en 1983). Pensamos que en una primera fase se construyeron las “maestras” o espigones perpendiculares a los muros que delimitaban el cauce central anterior y más tarde se unieron dos a dos formando traviesas. En cualquier caso, de las fotografías aéreas se aprecia también que sí había una traviesa cerca del final del tramo, pocos metros aguas arriba del puente de la N-630. En la fotografía aérea de 1977 no se ven las traviesas, sí las “maestras”.

Al rango mayor de incisión estimada por contracción en el tramo (entre 1.1 m y 1.9 m) habría que añadir los 0.5 m de erosión máxima esperable por el acortamiento de 128 m que supuso la canalización. Esta es la magnitud de la incisión que se ha calculado anteriormente y que podría también haber afectado al tramo aguas arriba del puente de los Leones (ver sub-apartado del tramo superior).

Las canalizaciones llevadas a cabo antes de 1977 (fases 1-4, Tabla 6) significaron una importante reducción de la longitud del cauce. Así, mientras que el tramo entre el puente de los Leones y el puente de la N-630 fue reducido en 1968 en 128 m, la siguiente fase de canalización hasta la confluencia con el Torío, finalizada en 1973, acortó el río en 528 m (un 23% de su longitud en 1956), Tabla 7. Esta reducción supone que este tramo puede haber sufrido una incisión por acortamiento de 1.9 m (considerando que la pendiente inicial del tramo es de 0.0036 m/m, Tabla 17). Esta erosión podría también haber afectado al tramo superior hasta que se construye el azud al pie del puente de los Leones, poco después de 1968. La presencia de la traviesa aguas arriba del puente de la N-630 hace que a estos valores de incisión no se deban añadir la erosión regresiva de la siguiente fase de la canalización, entre la confluencia con el Torío y el final del T.M. de León finalizado en 1983 (Tabla 6).

Así, hasta 1973, en el final de la canalización entre el puente de la N-630 y la confluencia con el Torío, la máxima estimación de la incisión es $(1.1-1.9 \text{ m}) + 0.5 \text{ m} + 1.9 \text{ m} = 3.5 \text{ m} - 4.3 \text{ m}$. Esta estimación toma en cuenta: 1) la erosión por contracción del tramo encauzado 1.1-1.9 m, 2) la incisión por acortamiento de la fase 2 de canalización 0.5 m (Tabla 6) y 3) la correspondiente erosión por la reducción de la longitud de la fase 4 de la canalización, aguas abajo del puente de la N-630 (Tabla 6), 1.9 m.

La insuficiencia de estas estimaciones respecto a los datos obliga a considerar como factor importante en la incisión del tramo las extracciones de material aluvial realizadas en sectores aguas abajo (de las que no se tiene información) y cuyos efectos (erosión regresiva) podrían haber afectado el tramo en cuestión gracias a la falta de traviesa que habrían limitado su propagación hacia agua arriba. Recordemos que no es hasta 1973 cuando aparece la traviesa unos metros agua arriba del puente de la carretera N-630 (Figura 52). Como antes, a estos efectos cabría añadir la incisión provocada por la reducción del suministro de sedimento causado por la construcción de los muros de canalización aguas arriba del puente de los Leones (fases 1 y 3, Tabla 6).

b) de 1995 a 2017

Los datos del perfil de 1995 no son suficientes para calcular la incisión en este tramo. Los siguientes registros del perfil corresponden a los años 2009 y 2017. Los primeros, de 2009, quedan situados sobre los de 2017, más detallados. Las traviesas del tramo se construyen para frenar la incisión. Aunque más marcado en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Torío, sorprende que las traviesas, lejos de frenar la incisión, la incrementan: el lecho entre traviesas evoluciona hasta dar como resultado perfiles longitudinales en contrapendiente: el extremo inferior en cada tramo está por encima que su extremo superior. Esto se observa en los datos de 2017-secciones, por el tálweg de 291 secciones, no en los datos 2017-longitudinales mucho más numerosos, no por el tálweg. Este proceso se debe al efecto que la erosión local al pie de la traviesa (producida por la caída del agua que vierte por encima de la estructura) tiene sobre el perfil longitudinal y que hace que la pendiente del lecho entre traviesas disminuya con la distancia entre traviesas: cuanto menor sea la distancia entre traviesas, más tendida será la pendiente del lecho (Martín-Vide y Andreatta, 2009). En este tramo del Bernesga esta distancia, de unos 125m, provoca que la pendiente del cauce se reduzca hasta el punto de desarrollar contrapendientes (pendientes negativas): la pendiente media del lecho entre traviesas en este tramo es -0.0088 m/m. Según consta en los planos de los proyectos consultados, las traviesas se ejecutaron a modo de zanjas, con el nivel del cauce a ambos lados de la traviesa (Figura 48). El hecho de que las pendientes de las rectas que pasan por la coronación de las traviesas casi

coincidan con las pendientes proyectadas en Las canalizaciones (0.0039 m/m y 0.0035 para los tramos aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío, respectivamente) nos hace pensar que realmente las obras se ejecutaron según se dispuso en gabinete. Sabiendo entonces las pendientes iniciales, si se supiera la fecha en que se construyeron las traviesas, se podría calcular el volumen de material perdido integrando las diferencias de cota entre el perfil longitudinal que une la coronación de las traviesas y el perfil longitudinal de 2017. Calculando la diferencia de áreas entre ambos perfiles y dividiendo por la longitud del tramo, se obtiene que la incisión media registrada desde que existen las traviesas es de 2.1 m (la incisión media no es muy satisfactoria porque lo característico de las traviesas es un fuerte gradiente, con erosión nula en la propia traviesa pero aguda al pie de la traviesa siguiente aguas arriba). Este valor representa para el tramo entre el puente de la N-630 y la confluencia con el Torío, un volumen de $-90,000 \text{ m}^3$, mucho mayor que el volumen acumulado entre 2009 y 2017 aguas arriba del puente de los Leones ($+28,000 \text{ m}^3$). Es por ello que esta acumulación no puede explicar por sí sola la incisión en el tramo de traviesas. Las propias traviesas son las principales causantes.

Esta incisión media (2.1 m) es debida por un lado al papel que juegan las traviesas modificando el perfil longitudinal entre ellas. A esta causa se la podría llamar *endógena*, es decir, provocada por motivos internos, en este caso por la presencia de traviesas. Por otro lado, a esta incisión, desconectada de la erosión aguas abajo (la presencia del vado, de la solera del puente de Alija y del resto de traviesas aguas abajo impiden que la incisión en tramos inferiores remonte), podría haber contribuido la disminución paulatina de la aportación sólida por cambios en los usos del suelo de la cuenca, ver §11, o por las extracciones de material en tramos superiores, ver §10.4, o por la presencia de muros de canalización que excluyen importantes áreas de sedimento del transporte. Por analogía, a esta segunda causa de incisión podría denominársela *exógena*, o producida por agentes externos al propio tramo.

Tramo confluencia con el Torío - final de la canalización (traviesa 35 o vado)

La evolución del perfil longitudinal del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío es sensiblemente diferente de la del tramo superior. Este tramo es el último que se encauza con muros de hormigón (Tabla 6). Las obras de canalización, que finalizan en 1983, implicaron una

drástica reducción de la anchura del río. La anchura media total del cauce en esta zona en 1956 era de 543 m (300 m si solo se cuenta el cauce y el material aluvial). Esta anchura se reduce a 105 m en 1977 y 49 m en 2002 (primera fotografía aérea después de las obras). Como ya se ha mencionado antes, esta canalización supuso también el acortamiento del 27% de la longitud del cauce, 790 m.

Con los datos del perfil longitudinal del proyecto de canalización, de 1976, se obtiene que la pendiente del lecho en ese año era de 0.0034 m/m (Tabla 17) y que para entonces, la incisión sufrida asciende a 5.2 m (Tabla 16). En ese momento, ya se habían ejecutado todas las canalizaciones en tramos superiores, incluido el del último tramo del Torío. Estas canalizaciones supusieron, en total, la extracción de 440,000 m³, ver §10.4. Este volumen de material extraído limita el suministro de sedimento contribuyendo pues a la incisión. Pensamos sin embargo que gran parte de la erosión registrada en este tramo se debe a las extracciones llevadas a cabo en los tramos aguas abajo, en el T.M. de Villaturiel. Como se ha mencionado en el apartado §10.4, no se han conseguido los volúmenes de extracción de material aluvial anteriores a 1987. Las áreas contiguas aguas abajo del Torío que han sido afectadas por la incisión son mucho mayores en 1977 que en 2002: mientras que en 2002 alcanzan 56 ha, en 1977 ascienden a 139 ha. El mismo análisis con la fotografía aérea de 1956 revela que la actividad extractiva a nivel industrial no había empezado. Esta mayor actividad en 1977, visible en fotografía aérea, conjuntamente con el hecho de que la gran expansión de la Ciudad de León se produjo en el periodo de tiempo durante el cual se realizaron las grandes canalizaciones en el Bernesga, nos hace pensar que las extracciones anteriores a 1987 fueron mucho mayores que las llevadas a cabo posteriormente. Al mismo tiempo, la inexistencia de zonas de extracción visibles en 1956 nos inclina a pensar que las grandes extracciones en el Bernesga se llevaron a cabo entre 1960-65 y 1980-85. Como se ha visto anteriormente, ver §14.3, la incisión causada por las extracciones migra hacia aguas arriba si no hay ninguna estructura transversal que lo evite. Hasta 1983, no hay impedimentos para que la incisión de los tramos inferiores del Bernesga migre hacia aguas arriba, precisamente cuando se termina la última fase de la canalización aguas abajo de la confluencia con el Torío.

Posteriormente a 1976, el perfil longitudinal del río continúa descendiendo: en 1995, la incisión alcanza 6.1 m. Es destacable que al igual que en el tramo contiguo, las traviesas no han contribuido a detener la incisión. La incisión en 2009 y 2017 hace descender el lecho, en promedio hasta los 7.1 m y los 8.1 m, respectivamente. El mismo cálculo anterior comparando el perfil de 2017 con el que pasa por la coronación de todas las traviesas arroja una erosión media de 2.1 m, igual que la de más arriba. El tálveg entre traviesas, separadas entre ellas unos 160 m, desarrolla perfiles longitudinales en contrapendiente. La pendiente media entre las traviesas de este tramo es -0.0060 m/m. Igual que para el tramo aguas arriba de la confluencia con el Torío, este valor representa un volumen de 113,000 m³, mucho mayor que los 28,000 m³ acumulados aguas arriba del puente de los Leones.

A la erosión posterior a las obras de 1983 podrían haber contribuido las obras de estrechamiento y el acortamiento que supuso la canalización. El estrechamiento (de una anchura de 105 m en 1977 a 49 m en 2002) podría causar una erosión a largo plazo de 0.67 m mientras que la disminución de la longitud podría ser responsable de 2.67 m. Recordemos que estas incisiones sí son acumulativas. A estas causas habría que añadir los efectos que la reducción del suministro de sedimento, tanto del Torío como de aguas arriba del Bernesga, podría tener sobre el perfil longitudinal.

Tramos: final de la canalización (traviesa 35 o vado) – puente de Alija de la Ribera – desembocadura al Esla

Estos son los tramos del Bernesga que más incisión han sufrido. El tramo entre el final de la canalización de 1983 (o el vado) y el puente de Alija de la Ribera se ha incidido, en promedio, 8.7 m. La incisión media en el tramo final del Bernesga, inmediatamente aguas arriba de la desembocadura al Esla alcanza en 2017 los 6.9 m (Tabla 16). Ninguno de estos tramos ha sido canalizado nunca. La evolución del perfil longitudinal está controlada, hasta 1997, por la cota del fondo del Esla en la confluencia con el Bernesga. A partir de ese momento, con la construcción de la solera de hormigón del puente de Alija en 1997, el tramo final se divide, desde el punto de vista del perfil longitudinal, en dos: el inferior hasta el puente de Alija y el superior desde este punto hasta su extremo aguas arriba (Figura 52).

El primer síntoma de incisión aparece en 1963, cuando se construye el puente de Alija de la Ribera. En ese punto, la incisión alcanza 1.1 m (Tabla 16, Figura 69). Obsérvese que este valor, aun siendo importante, queda muy lejos de los valores coetáneos de la incisión registrada en el tramo entre los puentes de San Marcos y de los Leones, que superaba los 4 m (Tabla 16). Pensamos que esta erosión podría estar causada por: 1) la disminución de la aportación sólida como efecto de la construcción de los muros de la canalización de 1911, que redujo la disponibilidad de sedimento hacia aguas abajo por estrechamiento del cauce y por 2) los posibles efectos de las extracciones de material en este tramo. Recordemos que es aguas abajo del final de la canalización de 1983 donde las extracciones han sido mayores y donde se piensa que fueron más importantes antes de 1987, ver §10.4.

No hay datos de la evolución del perfil longitudinal hasta 1995. Para entonces, la incisión en los dos tramos inferiores es 3.7 m y 5.2 m, respectivamente (Tabla 16). En ese momento el perfil longitudinal forma una sola unidad morfológica controlada por la cota del Esla en la desembocadura, que en 1995 es 769.1 m. Recordemos que en la misma desembocadura, la cota del Esla en 1919 era 772 m. Es decir que desde 1919 hasta 1995 el descenso en este punto ha sido de 3 m (ver Figura 61). Como se ha advertido en el apartado anterior, este descenso puede haber sido provocado por la propia dinámica del Esla o bien causado por las acciones sobre el Bernesga. Pensamos que este descenso es, a la vez, producto de la incisión del Bernesga y de la evolución del Esla.

Recordemos que la cuenca del Esla tiene, en el punto de la confluencia con el Bernesga, una superficie de 2,546 km². Este valor es más del doble que la superficie del Bernesga (1,176 km²), Figura 2. La superficie de la cuenca es un indicador del “tamaño” de río. Si el Esla fuera mucho mayor que el Bernesga, la cota del tálveg del Esla en todo el perfil longitudinal (y en particular en la confluencia con el Bernesga) sería prácticamente independiente de la evolución del Bernesga y solo dependería de su propia dinámica (la del Esla). Por el contrario, si ambos ríos fueran de dimensiones similares, la cota del tálveg del Esla en la desembocadura sería función de su evolución, pero también de la del Bernesga. Atendiendo a este razonamiento, podríamos decir que como la cuenca del Esla es bastante mayor que la del Bernesga, es el Esla el que

controla el perfil longitudinal del Bernesga. Sin embargo, la presencia de embalses en la cuenca modifica esta impresión. Los dos embalses de la cuenca (Porma y Riaño) regulan aproximadamente un tercio de la cuenca del Esla aguas arriba de la confluencia con el Bernesga (Figura 2). La regulación significa la laminación de avenidas, la disminución de los caudales asociados a las crecidas ordinarias, todo ello resultando en una reducción del caudal unitario. Además, las presas limitan el transporte sólido hacia aguas abajo, que se acumula en los embalses. El primer efecto permite la invasión del cauce por parte de la vegetación, haciéndolo progresivamente más estrecho. El segundo efecto es el de limitar la disponibilidad de sedimento a la parte de cuenca que no está regulada. Ambos efectos conducen hacia una incisión general del cauce aguas abajo de las presas.

En vista de lo anterior, pensamos que la presa de Riaño podría tener una influencia escasa en la pérdida de cota del Esla entre 1919 y 1995 ya que entró en servicio en 1988 y creemos que siete años son pocos para que la confluencia, situada a 87 km aguas abajo de la presa, note el efecto de la retención de sedimento en el embalse. Lo mismo nos atrevemos a decir en relación a los efectos en la reducción del caudal dominante y el estrechamiento del cauce provocado por la invasión de la vegetación. Respecto a la influencia del embalse de Porma, aunque entró en funcionamiento casi 20 años antes, en 1969, la cuenca aguas arriba del embalse representa un 10% de la del Esla. Aunque podría tener algún efecto que condujese el Esla a la incisión dado el tiempo transcurrido hasta 1995, pensamos que podría ser menor comparado con otras causas. Entre estas causas pensamos que las extracciones de material en el propio Esla, conjuntamente con las llevadas a cabo a lo largo del Bernesga son la variable clave que explica el descenso del tálveg en la confluencia.

En este sentido, la reducción de la pendiente en ambos tramos del Bernesga (Esla-puente de Alija y puente de Alija-vado) desde el perfil prístino al perfil de 1995 (Figura 70) es una prueba de que una parte de la incisión es causada por la propia dinámica del Bernesga: la cota del Esla solo afecta a la cota de arranque del perfil del Bernesga, no a su pendiente, que depende de la disponibilidad de sedimento desde aguas arriba. Los resultados de la Tabla 17 ilustran una reducción de la pendiente del 12.6% en el tramo inferior y del 9.8% en el tramo superior. Es

importante destacar que según los sondeos realizados en 1963 para la construcción del puente de Alija, el sustrato rocoso no había aflorado todavía en 1995 (Figura 60). Es decir, que la reducción de la pendiente del cauce es, por lo menos hasta 1995, un proceso de incisión de un lecho aluvial cuya evolución está controlada por las variables mencionadas al principio: Q , Q_s , D , S y B .

Analizando en detalle la evolución del tálveg en el puente de Alija, vemos que en 1995, la incisión alcanza 3.8 m (Figura 69 y Figura 72). Vemos sin embargo en las mismas figuras que es entre 1995 y 2009 cuando se registran los mayores descensos del lecho.

La evolución del perfil longitudinal después de 1995 continúa con la misma tendencia anterior. El tramo inferior se incide hasta 2009 en 1.1 m más, alcanzando, en promedio los 4.8 m mientras que el tálveg del tramo aguas arriba del puente de Alija desciende 2.1 m de media y la incisión acumulada alcanza los 7.2 m. Es importante ver que la pendiente de ambos tramos continúa reduciéndose, quedando patente la importancia de la propia dinámica del Bernesga en la incisión registrada. Recordemos que es en 1997 cuando se ejecuta la solera de hormigón del puente de Alija que independiza los dos tramos.

La cota en la confluencia se mantiene relativamente estable después de 1995: en 2009 está a 770.1 m y en 2017 a 768.1 m (recordemos que en 1995 estaba a 769.1 m). Sin embargo, como la pendiente del lecho continúa descendiendo (Tabla 17), pensamos es la propia dinámica del Bernesga la que controla su evolución en estos tramos. Esto es estrictamente cierto para el tramo aguas arriba del puente de Alija por la presencia de la solera de hormigón que lo hace independiente del tramo inferior.

Las extracciones de material entre 1995 y 2004 suman un volumen oficial extraído en estos tramos de 63,000 m³ (Tabla 8). Aun siendo una cantidad importante, es más de un orden de magnitud inferior al volumen extraído con anterioridad. Parece entonces que las extracciones no serían las responsables de la gran incisión que ha ocurrido en ambos tramos desde 1995. En la fotografía aérea de 2002 ya se aprecian largos tramos en los que el zócalo rocoso ha aflorado.

Tabla 18. Evolución de la anchura del cauce de los dos tramos inferiores del Bernesga.

tramo	extremo inferior	extremo superior	L	anchura total (m)			
			(m)	1956	1977	2002	2017
1	Esla	puente Alija	6171	365	182	96	29
2	puente Alija	vado	4378	400	271	89	40

Creemos que el proceso de incisión desde 1995 hasta 2017 en estos dos tramos es más bien causado por la concentración del flujo en un cauce ya muy estrecho (entre 89 m y 96 m en 2002, Tabla 18; estas anchuras, totales, se reducen a 30 m y 26 m si solo se cuenta el cauce ocupado por agua y el material aluvial visible). Las fotografías aéreas de 2002 y 2004 ya muestran el zócalo rocoso del terciario en muchos sectores de estos dos tramos. Esto significa que los depósitos aluviales del cuaternario en esta zona ya se habían agotado o estaban en proceso de agotarse. La anchuras medias totales en estos tramos se reducen en 2017 a 29 m y 40 m (Tabla 18), quedando en tan solo 18 m si se cuenta únicamente el cauce y la fracción ocupada por material aluvial. Vemos pues que entre 2002 y 2017, la anchura total se ha reducido entre un 55% y un 70% (el ancho aluvial se ha reducido entre un 28% y un 40%). Pensamos que esta reducción de la anchura está vinculada a la evolución de la incisión.

En las visitas de campo hemos comprobado que el material arcilloso del terciario es fácilmente erosionable. También hemos observado que el fondo del lecho, lejos de tener una superficie suave, presenta fuertes irregularidades, entrantes y salientes de roca arcillosa que pensamos que son causados por diferencias en su *erosionabilidad* (Figura 11, Figura 26 y Figura 27). Pequeñas irregularidades del fondo, pensamos que menores en origen cuando la desaparición del aluvial cuaternario descubre el zócalo inferior, hacen que el flujo se concentre por esas

zonas. La acción del flujo concentrado representa un aumento del caudal unitario (como en las canalizaciones). Este aumento del caudal unitario redundaría en un aumento de la tensión media que ejerce el agua sobre el fondo, que de este modo retroalimenta el proceso de incisión. Vemos pues que las pequeñas irregularidades del fondo desencadenan un proceso conjunto de estrechamiento y incisión que se retroalimenta: la concentración del flujo es causa de erosión del lecho que a su vez incrementa la concentración del flujo. La cohesión del material arcilloso es la que permite tener un cauce muy estrecho con las márgenes casi verticales. Creemos que este proceso, llamémosle de *autoincisión*, es el que también se da en tramos aguas arriba del puente de San Marcos, alrededor del kilómetro 20 siguiendo el eje del río desde su desembocadura (Figura 11).

Tramos aguas arriba del puente de San Marcos

Los aproximadamente 13 km aguas arriba del azud de San Marcos son los tramos que menor incisión han sufrido. Esto se debe a que las acciones (canalizaciones y extracciones de material) en estos tramos no han sido tan intensas como las llevadas a cabo en tramos inferiores: no es hasta 2002 cuando empiezan las obras de canalización del tramo aguas arriba del puente de San Marcos y el volumen de material oficialmente extraído es mucho menor que lo concedido a lo largo de los tramos inferiores del Bernesga (T.M. de Villaturiel y Vega de Infanzones, Figura 1, Tabla 8).

En 1968 se construye el azud de San Marcos (Figura 52). Desde este momento, la evolución del perfil longitudinal del tramo aguas arriba es independiente de la evolución del tramo inferior. Pensamos que esta desconexión entre ambos tramos es en gran medida responsable de las menores incisiones registradas.

El tramo comprendido entre el inicio del estudio (T.M. de Cuadros, Figura 1) y el puente de San Marcos se ha dividido en dos en el punto donde se ubica un pequeño azud desmontable, azud de Sariegos, situado en la coordenada 21.6 km (Figura 62 y Figura 68). Así, mientras que la incisión media en el tramo inferior, aguas abajo de este pequeño azud alcanza en 2017 los 4.5 m, el tramo superior muestra un pequeño crecimiento de 0.1 m (Tabla 16). Este es un resultado

espurio producto de la interpolación completa del perfil longitudinal prístino. En realidad, este tramo también se ha incidido.

Para comprobar este aspecto, la evolución del tálveg en la coordenada del puente de Carbajal de la Legua (Figura 62) es suficiente. Las Figura 69 y Figura 7056 muestra en este sentido que la incisión en 2017 en este punto es de 2.2 m. Sin embargo, no es hasta 2009 cuando los signos de erosión se hacen visibles. El descenso de cota en este punto continúa hasta la fecha actual. Compárese esta evolución con la sufrida por el punto donde se proyectó un puente en 1972. Para comparar la evolución de la cota, debemos saber la coordenada longitudinal de ambos puntos: el puente de 1972 se sitúa en la coordenada $s = 17.1$ km y el puente de Carbajal de la Legua está en la coordenada $s = 23.8$ km. La Figura 69 muestra que el punto inferior ya sufre una erosión superior a 2 m en 1972. En cambio, la incisión no alcanza el puente de Carbajal hasta 2009. La gran diferencia entre ambas tendencias puede estar en la construcción alrededor de 1968 del azud de San Marcos. Pensamos que gran parte de la incisión en el puente inferior hasta el año 1972 fue debida a la erosión ocurrida en los tramos aguas abajo del azud que se propagó hacia arriba (erosión regresiva o remontante). Una vez construido el azud, estos efectos dejan de afectar al tramo superior. La comparación de estos dos puntos prueba la existencia de la erosión regresiva y cómo esta se amortigua con la distancia.

La incisión registrada entre 1972 y 1995 en el puente inferior (1 m) no es producida por los encauzamientos aguas arriba del azud de San Marcos (finalizados en 2002 y 2009, no son canalizaciones como todas las obras más antiguas). A esta erosión también podría contribuir la parte de la erosión regresiva causada por las canalizaciones inferiores, que no se materializó por completo en 1972. También podría ser debida a los efectos de las extracciones de material del lecho. En este sentido, entre 1988 y 1992 se extrajeron $36,000 \text{ m}^3$ del Bernesga a su paso por Sariegos (Figura 54). Pensamos, igual que antes, que las extracciones anteriores a 1988 podrían haber sido mayores. La erosión regresiva de estas extracciones (Figura 67) no habría alcanzado al puente de Carbajal. Como el tálveg en el puente de Carbajal (cerca del extremo superior del tramo estudiado y sin afluentes importantes entre los dos puntos) no experimenta ninguna erosión en 1995, debemos descartar los efectos que sobre el perfil pudiera tener la

disminución de la aportación sólida de la cuenca, por lo menos hasta esa fecha. En este sentido, los resultados del análisis del cambio de usos de la cuenca, ver §12, indican que la superficie urbanizada se ha duplicado desde 1990 mientras que la superficie agrícola se ha reducido en un 22 % y la forestal ha aumentado apenas un 1%. Sin embargo, el relativamente bajo porcentaje que representan las superficies urbana y agrícola, que no alcanzan el 25% de la superficie de la cuenca (Tabla 13) nos hacen pensar en un efecto moderado de estos cambios sobre la aportación sólida, al menos por los cambios entre 1990 y 2018. Pensamos que el abandono de cultivos de 1956 hasta 1990 y su consiguiente transformación en bosque ha sido más intenso que el detectado desde 1990.

Entre 2002 y 2009 se ejecutan los últimos tramos de la canalización del Bernesga en León. Las últimas extracciones concedidas aguas arriba del azud de San Marcos son de 1992. Para entonces, ya existían todas las estructuras transversales que hacen independiente el comportamiento morfodinámico del tramo superior del Bernesga de los tramos aguas abajo de la ciudad de León, ver §10.3. Son pues estos encauzamientos los principales responsables de la incisión posterior a 2009 tanto en el puente proyectado en 1972 como en el de Carbajal. Es significativo analizar cómo la incisión se detiene en el puente inferior pero continúa su avance en el superior, el de Carbajal (Figura 69). Este proceso podría ser debido a: 1) los efectos retardados (en tiempo y en magnitud –amortiguamiento) de la incisión regresiva (hacia aguas arriba) causada por las canalizaciones más antiguas aguas abajo del puente de San Marcos y 2) los efectos que la reducción de la disponibilidad de sedimento por el cambio de usos de la cuenca tiene sobre el perfil. En este segundo caso, tendríamos una erosión progresiva que avanza hacia aguas abajo.

El análisis anterior y las fotografías tomadas en la visita de campo del 25 de octubre dibujan un río en que la incisión no se ha detenido, sino que progresa de forma gradual hacia aguas arriba. Por la magnitud de la erosión en tramos inferiores -cerca de la coordenada $s = 20$ km se aprecia un cauce totalmente incidido en roca (Figura 11 y foto de la portada)- pensamos que el tramo superior del Bernesga en la zona de estudio está sufriendo un proceso de erosión regresiva. Es esperable pues que los tramos superiores sufran también incisión, si bien, como se ha dicho

antes, ésta pueda ser ligeramente menor que la registrada en tramos más aguas abajo. En este sentido, parece que los datos de los perfiles de 1995, 2009 y 2017 aguas arriba de la coordenada 27.5 km se agrupan formando un único conjunto (Figura 62). La pendiente media de este tramo (de 1.7 km de longitud) obtenida de esta agrupación es 0.0045 m/m. Esta pendiente no es muy distinta de la que arroja el perfil prístino en la misma zona (0.0040 m/m). Pensamos pues que este tramo podría estar indicando la frontera entre el Bernesga afectado por la incisión del todavía inalterado, aguas abajo y aguas arriba, respectivamente, de la coordenada $s = 27.5$ km.

15 ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO Y DE LA VELOCIDAD DE EROSIÓN DEL ZÓCALO ARCILLOSO

En este apartado se analiza, de forma cuantitativa, la capacidad de transporte y de erosión de algunos de los tramos del Bernesga más representativos. Para ello contamos con la información topo-batimétrica del modelo Hec-Ras y de los caudales medios diarios registrados en las diferentes estaciones de aforo de interés (ver §5).

15.1 Estudio de la capacidad de transporte sólido en León

El azud de San Marcos fue parcialmente demolido en verano de 2013: la cota de coronación del azud fue rebajada en 2.25 m (Figura 45), de tal manera que la base del azud que no se retiró ejerciera un control sobre el perfil longitudinal del Bernesga para, de este modo, proteger las cimentaciones del puente de San Marcos. La Figura 74 ilustra una vista cenital de la zona de San Marcos poco después de la demolición del azud. Como se puede apreciar en la imagen, la presencia de depósitos aluviales al pie del azud es evidente. El color rojizo del lecho aguas abajo del azud retirado, casi alcanzando la pasarela 5 (Tabla 2), situada unos 200 m aguas abajo del azud podría estar indicando el límite del sedimento en la fecha de la fotografía.

Este apartado trata de analizar cuál es la movilidad del material aluvial del tramo entre el azud de San Marcos y el puente de los Leones. Como se ha visto anteriormente (Figura 63), el perfil longitudinal de aguas arriba del puente de los Leones ha crecido entre 2009 y 2017. Este análisis pretende dar respuesta a la pregunta de hasta qué punto el azud de la central

hidroeléctrica al pie del puente de los Leones ha contribuido a la sedimentación del tramo, evitando que el material erosionado después de la demolición del azud de San Marcos haya alcanzado los tramos inferiores del Bernesga. Estimamos la movilidad del sedimento del cauce a partir de la tensión media en el fondo, τ . Esta tensión media se hace adimensional (tensión de Shields, τ_*) mediante el peso específico sumergido del material del fondo, $g(\rho_s - \rho)$ y del tamaño característico del material del fondo, D_{50} , siendo g la aceleración de la gravedad y ρ_s y ρ la densidad del sedimento y del agua respectivamente.

$$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D_{50}}$$



Figura 74. Fotografía aérea tomada con dron el día 23 de abril de 2014, poco después de la demolición del azud. Obsérvese el depósito de material al pie del azud parcialmente retirado.

Fotografía proporcionada por J.I. Santillán (CHD). El agua circula de arriba a abajo.

El material del lecho es móvil si la tensión adimensional de Shields supera un cierto umbral, τ_{*c} . Existe mucha controversia sobre qué valor es el que mejor define el umbral de inicio de

movimiento de las partículas del fondo cuando el lecho está compuesto por material de tamaños diferentes (granulometría variada). El valor de dicha tensión que suscita mayor consenso es el de $\tau_{*c} = 0.040$. El análisis, pues, consiste en saber qué caudales de los ocurridos después de la demolición del azud han superado, en el tramo entre los azudes de San Marcos y de la central hidroeléctrica, el umbral de inicio del movimiento.

El primer paso del análisis consiste en conocer el régimen de caudales en el Bernesga desde la demolición del azud hasta noviembre de 2017, fecha de la topografía del modelo Hec-Ras. La información hidrológica de este análisis son los caudales medios diarios obtenidos después de promediar los datos horarios de caudal registrados en la estación de aforos de León (Tabla 1) durante ese periodo. La Figura 75 ilustra el hidrograma de caudales medios diarios del Bernesga en León desde julio de 2013 hasta noviembre de 2017. Obsérvese cómo el mayor evento durante ese periodo ($Q = 247 \text{ m}^3/\text{s}$, el 2 de abril de 2014) podría haber sido el responsable de las acumulaciones de material al pie del azud y visibles en la fotografía aérea de tres semanas después (Figura 74). El resto de crecidas durante el periodo, entre una y tres al año, son inferiores al caudal dominante ($Q = 162 \text{ m}^3/\text{s}$, §9.1).

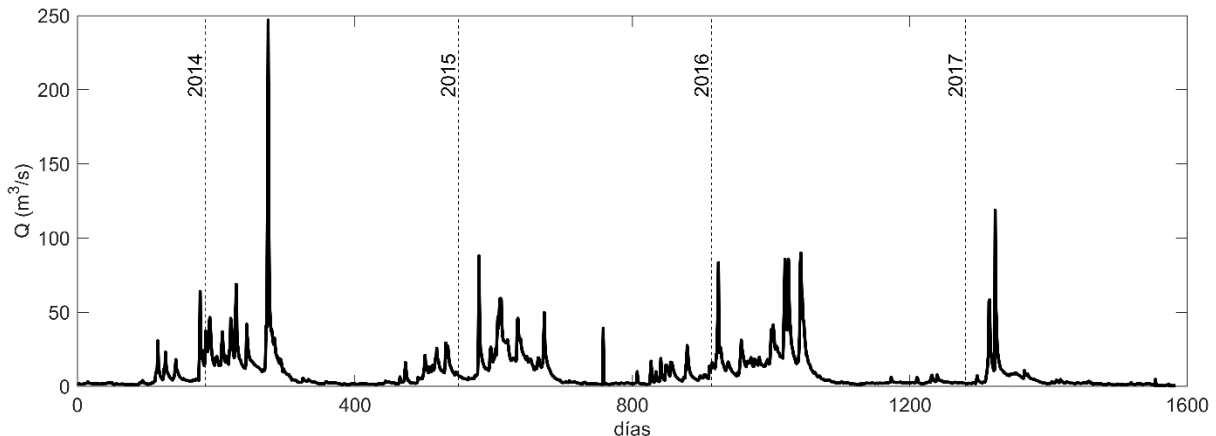


Figura 75. Hidrograma (caudal medio diario) del Bernesga desde julio de 2013 hasta octubre de 2017 registrado en la estación de aforos de León (Tabla 1).

El interés del análisis es conocer si las crecidas de la Figura 75 pueden haber contribuido a la sedimentación del tramo aguas arriba del azud de la central hidroeléctrica. No se trata de obtener la evolución de la cota del fondo del cauce en este periodo. Es por ello por lo que es conveniente transformar los datos de la Figura 75 en una curva de caudales clasificados o de frecuencia del periodo que va de julio de 2013 hasta noviembre de 2017.

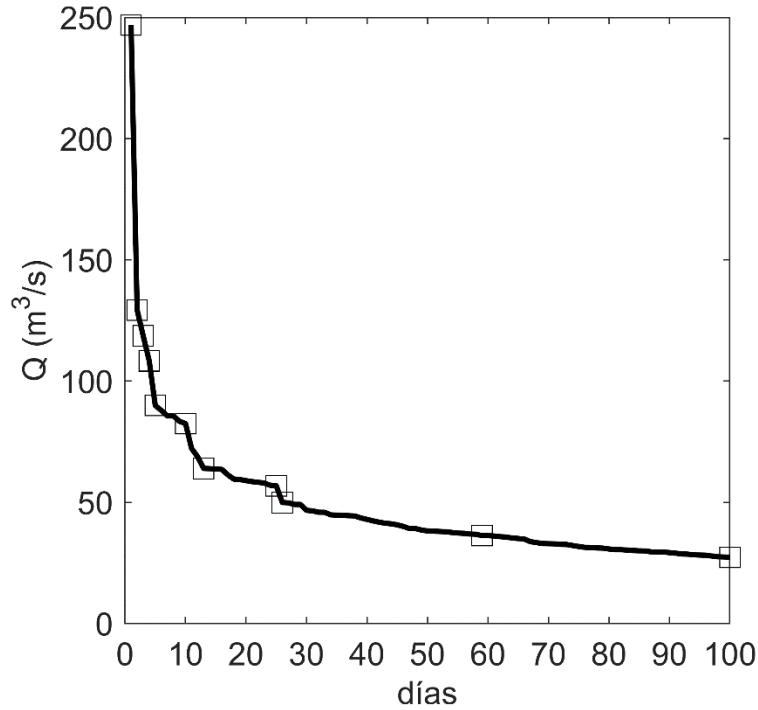


Figura 76. 100 primeros días de la curva de caudales clasificados anual del Bernesga en León. Los cuadrados indican los caudales seleccionados para el cálculo de la tensión media en el fondo.

De la curva de caudales clasificados obtenida (Figura 76), se han seleccionado los caudales más significativos de los primeros 100 días, representativos de un 27% del tiempo transcurrido entre julio de 2013 y octubre de 2017. Estos caudales se han introducido en el modelo hidráulico Hec-Ras. El cálculo de la tensión media en fondo se hace mediante la expresión:

$$\tau = g\rho R_{hc} I$$

en la que R_{hc} e I son, respectivamente, el radio hidráulico en el cauce y la pendiente motriz, obtenidos con Hec-Ras. El tamaño del material del fondo es 19.4 mm, §8.

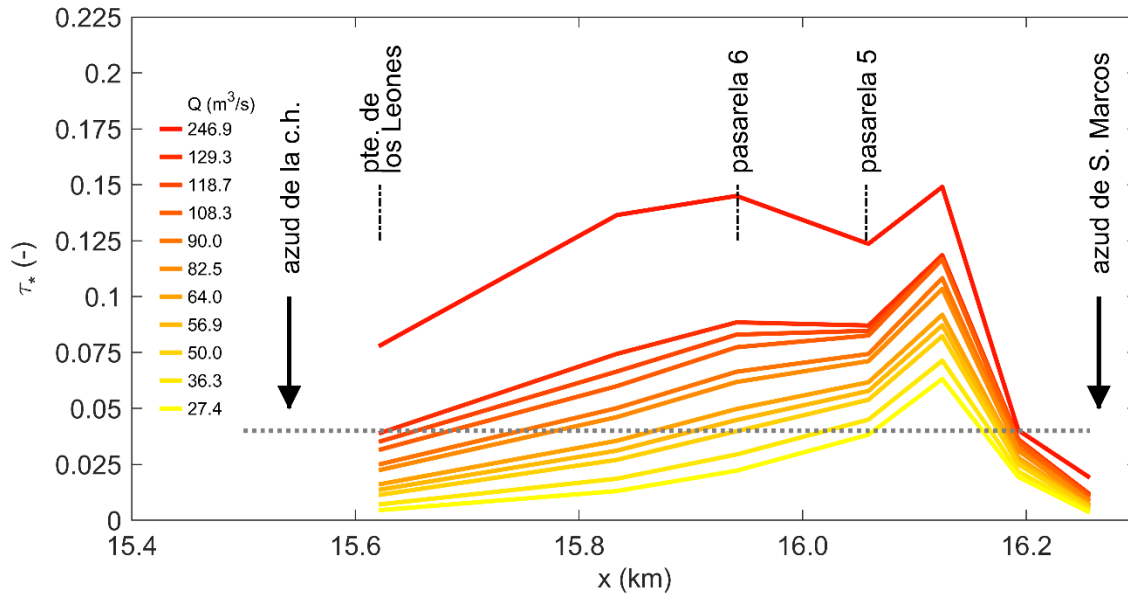


Figura 77. Distribución espacial de la tensión adimensional de Shields en el tramo entre los azudes de San Marcos y de la central hidroeléctrica para los caudales representativos de la curva de caudales clasificados del periodo julio 2013- octubre 2017 (Figura 76). La línea gris horizontal denota la tensión crítica de inicio de movimiento.

Los resultados del cálculo de tensiones (Figura 77) ilustran el remanso que provoca el azud de la central hidroeléctrica. La tensión en el fondo asciende rápidamente en una distancia de unos 100 m aguas abajo del azud de San Marcos. A partir de este punto, la tensión de Shields disminuye de forma gradual en la dirección del flujo, haciendo evidente el efecto del remanso provocado por el azud de la central. La tensión de fondo excede la tensión crítica de inicio de movimiento en todo el tramo para el caudal mayor registrado después de la demolición del azud ($Q = 247 \text{ m}^3/\text{s}$). Esto implicaría que durante esa crecida, que recordemos que se produjo unas semanas antes de la fotografía aérea de la Figura 74, todo el tramo podría haber sido capaz de transportar el sedimento que hubiera llegado al azud de San Marcos. Esta gran capacidad de transporte pudiera ser la responsable de los depósitos aluviales que se aprecian

que cubren parte del azud en su margen izquierda en la Figura 74. Esa crecida ha sido la única realmente activa (movilizadora del material) en más de 4 años.

El tramo entre azudes cuyo material podría ponerse en movimiento ($\tau_* > \tau_{*c}$) se acorta a medida que disminuye el caudal (Figura 77), es decir que cuanto mayor es el caudal, mayor es la longitud de dicho tramo que es capaz de transportar sedimento. Si hubiera habido suficiente disponibilidad de sedimento desde aguas arriba, con lo que la capacidad de transporte del tramo se satisficiera, el material transportado podría ser el que en realidad constituye los grandes depósitos emergidos al pie del azud en la actualidad (Figura 78) y también en el tramo entre las pasarelas 5 y 6 (Figura 13).



Figura 78. Vista del Bernesga des del puente de San Marcos hacia aguas abajo. Obsérvense los grandes depósitos de material entre el puente de San Marcos y la pasarela 5 al fondo.

Fotografía tomada el día 1 de mayo de 2019.

Esta acumulación de material está relacionada, como se ha dicho, con el remanso que crea el azud de la central hidroeléctrica. Es por este motivo por lo que pensamos que el azud de la central limita el suministro de material sólido hacia tramos inferiores del Bernesga. Esta

limitación, se amortiguaría con el tiempo en la medida en que el vaso del azud de la central se llene de sedimento y consecuentemente disminuya el remanso que crea en el tramo aguas arriba.

15.2 Análisis de la capacidad de transporte en tramos alejados de León

Se ha calculado la movilidad del sedimento, expresada en términos de la tensión media en el fondo para distintos tramos de interés. La tensión media resultante en cada tramo se ha adimensionalizado y se ha comparado con la tensión de inicio de movimiento. Se trata de un análisis similar al que se ha llevado a cabo para conocer el transporte aguas abajo del azud de San Marcos después de su demolición parcial, ver §6. La diferencia principal es que en el caso que nos ocupa, la tensión representativa del tramo se ha obtenido promediando las tensiones de las secciones transversales de cada tramo. La otra diferencia es que, en vistas a hacer un pronóstico de la evolución futura de la capacidad de transporte, el cálculo de la tensión se ha llevado a cabo solamente con el caudal dominante, que varía en función de si el tramo está aguas arriba o aguas abajo de la confluencia con el Torío.

El análisis de la movilidad se ha realizado en cuatro tramos seleccionados (Tabla 19). El primero de ellos corresponde al extremo superior del estudio. Se trata del único tramo estudiado que no presenta signos evidentes de incisión (ver Figura 65). El segundo tramo analizado es el que va desde del puente de Carbajal de la Legua (Tabla 2) y el final de la actuación de canalización del año 2009 (§13). Los dos tramos restantes corresponden a los situados entre el vado demolido en 2015 y el puente de Alija de la Ribera y el que va desde este último puente hasta la desembocadura al Esla. La Tabla 19 enumera los tramos y su ubicación en el tramo estudiado del Bernesga. La presencia de azudes y traviesas en el tramo urbano de León hace que un análisis como el anterior deje de tener sentido.

Tabla 19. Identificación de los tramos para el análisis de la movilidad del material aluvial del Bernesga y tensiones medias (dimensional τ y adimensional τ_*) de cada tramo. B_{2017} y S_{2017} hacen referencia a las anchuras y pendientes medias según la cartografía de 2017. Q es el caudal dominante.

tramo	s-coord. inicial (m)	s-coord. final (m)	longitud (m)	Q (m^3/s)	B_{2017} (m)	S_{2017} (m/m)	τ (Pa)	τ_* (-)
1	27,500	29,291	1,791	162	28	0.0045	60	0.19
2	18,698	23,482	4,784	162	25	0.0047	85	0.27
3	6,171	10,549	4,378	308	18	0.0022	66	0.21
4	0	6,171	6,171	308	18	0.0019	74	0.24

Para hacer la discusión de los resultados obtenidos, recordemos que la tensión crítica de inicio de movimiento es $\tau_{*c} = 0.04$, ver §15.1. Esto significa que como la tensión media adimensional de cada tramo supera, como era de esperar, la tensión del umbral del transporte, el caudal dominante es capaz de transportar sedimento. La tensión adimensional resultante del cálculo anterior está en una horquilla que es entre 4.8 y 6.7 veces la tensión crítica del inicio de movimiento. Esta gran distancia entre ambas tensiones no es habitual en ríos de grava en equilibrio: en estos ríos, la tensión adimensional asociada al caudal dominante es entre 1-2 veces la tensión crítica de inicio de movimiento. Este es pues un indicador indirecto de la incisión del Bernesga. El valor de τ_* en el tramo superior, en donde no se ha detectado una incisión significativa, es el resultado del gran estrechamiento que ha sufrido el cauce desde 1956, cuando su anchura era 233 m, ver Tabla 15. El último punto fijo en el perfil longitudinal en esta zona es el que corresponde al azud de Sariegos, situado en la coordenada 21,657 m (Tabla 3). No existe pues ningún impedimento para que la incisión observada aguas abajo del puente de Carbajal de la Legua progrese hacia aguas arriba.

El hecho de que la pendiente en el tramo del extremo superior sea menor que la del tramo inmediatamente situado aguas abajo (Tabla 19) indica la presencia de un cambio brusco del perfil longitudinal, que es contrario a la disminución gradual de la pendiente hacia aguas abajo

que ocurre en cauces aluviales. Esta perturbación del perfil longitudinal señala la presencia de un salto en la pendiente o *knickpoint*, que es expresión de una incisión remontante. Como se ha dicho más arriba, el tramo superior, todavía no alterado por la erosión del lecho, va a verse alcanzado por la incisión regresiva procedente de aguas abajo.

Aunque la tensión media adimensional en todos los tramos está alrededor de 0.2, existen diferencias notables entre ellas: la tensión media del extremo superior es un 71% inferior que la del tramo siguiente, aguas abajo del puente de Carbajal de la Legua. Esto hace que todo este último tramo vaya a transportar todo el material que el tramo superior le pueda suministrar. Pensamos que la reducción de anchura del río a medida que el cauce se concentra en el sustrato rocoso es la responsable de esta mayor capacidad de transporte. Este sedimento, y el que pueda arrastrar el río de los pocos depósitos aluviales que queden en el propio cauce antes de llegar a la León contribuirán en gran medida a colmatar el vaso del azud de la central hidroeléctrica.

En caso de que el material suministrado desde aguas arriba alcance el extremo inferior de la canalización, aguas abajo del vado destruido en 2015, tampoco lo tiene fácil para permanecer en el Bernesga. Obsérvese que la tensión media en los dos tramos inferiores del río excede a la tensión media del tramo del extremo superior (Tabla 19). Este resultado hace que sean necesarias acciones para 1) aumentar el suministro de sedimento desde aguas arriba y 2) favorecer que el material sólido que alcance los tramos inferiores no sea transportado al Esla.

15.3 Retroceso del salto vertical del antiguo vado destruido en 2015

Este apartado analiza la velocidad del retroceso del salto que había al pie del vado demolido en 2015 (Figuras 17-21). Como información de partida se dispone de las fotografías aéreas de 2014, 2015 y 2017 (Figura 21), en las que se aprecia que el frente del salto, que estaba situado al pie del vado destruido en 2015, ha progresado 71 m hacia aguas arriba en 2017. En la última visita de campo en mayo de 2019 parecía que el salto había retrocedido un poco más. Nos centraremos en el proceso ocurrido desde 2014 hasta 2017. Recordemos sin embargo que las obras de demolición del vado se llevaron a cabo en verano de 2015 (Figura 19). Asumimos pues que la posición del frente en 2015 es la del vado, despreciando pues la menor erosión

remontante del salto entre 2014 y 2015 (Figura 21). Con esta hipótesis, la velocidad del retroceso del es de 8.4 cm/día.

El hidrograma registrado en la estación del puente de Alija de la Ribera (Figura 2) entre julio de 2015 y noviembre de 2017 se ilustra en la Figura 79. Los caudales medios diarios de la Figura 79 se han obtenido después de promediar los caudales medios horarios proporcionados por la C.H.D., ver §5.

El efecto que los caudales tienen en la erosión del fondo del salto y en su retroceso puede estimarse calculando la potencia disipada por el agua al cruzar el salto. A la potencia obtenida obtenido habría que aplicar un coeficiente (menor que la unidad) para tener en cuenta el rendimiento del agua en erosionar el zócalo rocoso: no toda la energía del agua se consume en erosionar la roca, una parte se disipa en el resalto hidráulico o en fricción con el fondo. Para este análisis simplificado consideramos rendimientos unitarios e iguales para todos los caudales. Esto significa que el resultado del cálculo es una cota superior de la potencia disipada. Para el cálculo de dicha potencia en el salto usamos la expresión:

$$P = g\rho QH$$

en la que g y ρ son la aceleración de la gravedad y la densidad del agua, respectivamente, Q es el caudal y H es la pérdida de energía en el salto (Figura 80).

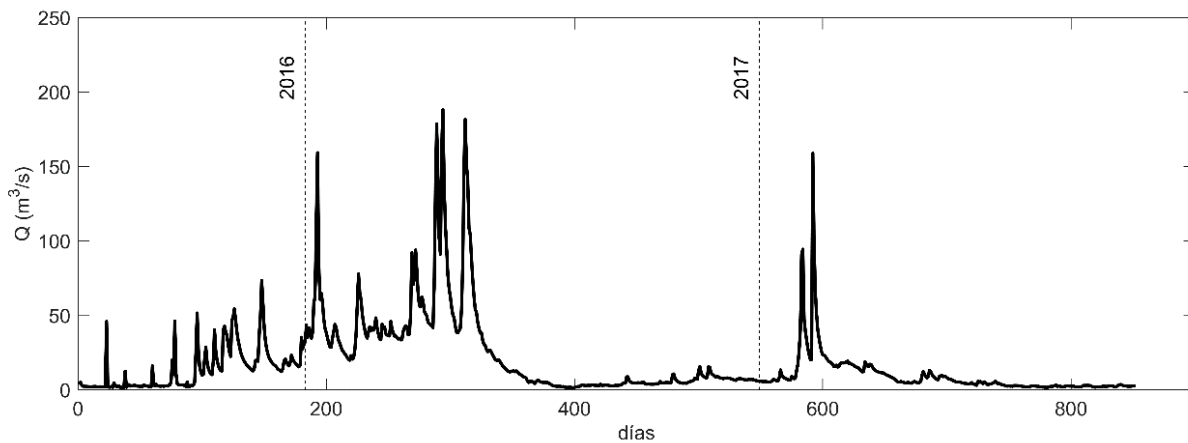


Figura 79. Hidrograma de caudales medios diarios registrado entre julio de 2015 y noviembre de 2017 en la estación de aforos de Alija de la Ribera.

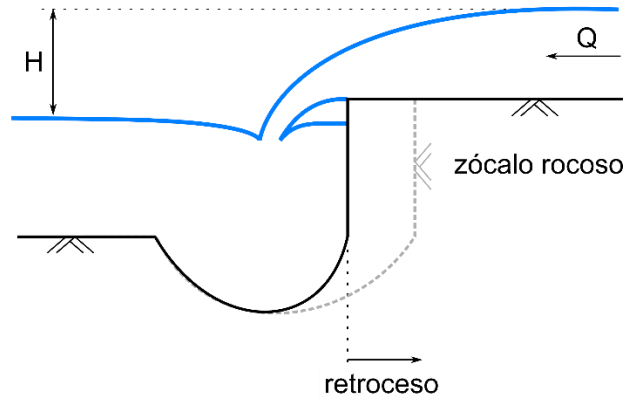


Figura 80. Esquema de erosión y retroceso del salto en un cauce rocoso.

A partir de la potencia, puede obtenerse fácilmente la energía total disipada E en el salto sin más que multiplicar el caudal por el tiempo en el que ese caudal está circulando. Para ello es útil convertir el hidrograma de la Figura 79 en la curva de caudales clasificados (Figura 81). En ella se han seleccionado los caudales que nos van a permitir calcular la energía total disipada después de la demolición del vado como:

$$E = \int_0^t P dt \cong g\rho \sum_{i=1}^N Q(i)H(i)\Delta t(i)$$

donde N hace referencia al número de caudales seleccionados $Q(i)$ de la curva de caudales clasificados siendo $\Delta t(i)$ la distancia entre ellos (en días en la curva de caudales clasificados).

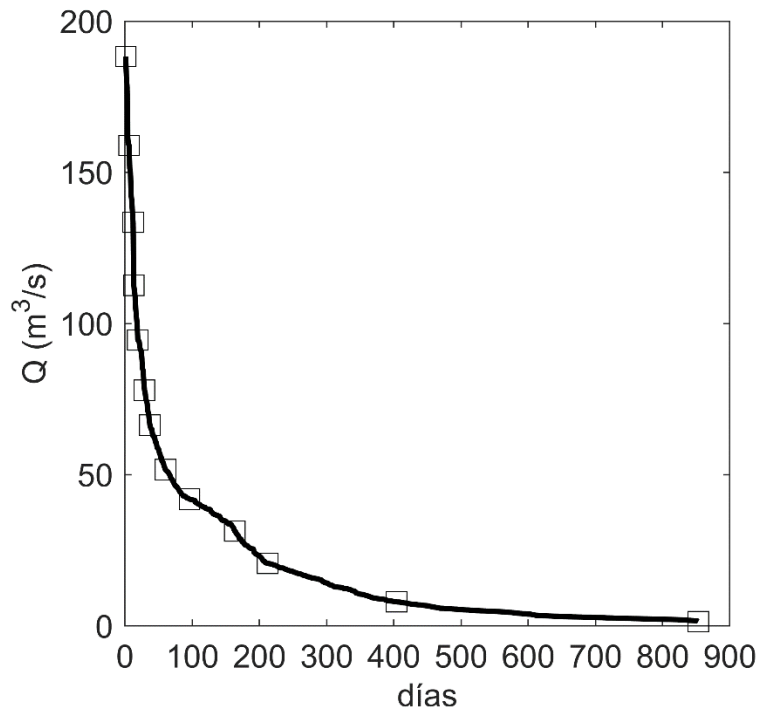


Figura 81. Curva de caudales clasificados registrados en la estación de aforos de Alija de la Ribera entre julio de 2015 y noviembre de 2017. Los cuadrados indican los caudales seleccionados para el cálculo de la energía total disipada.

La pérdida de carga en el salto H asociada a cada caudal seleccionado se ha obtenido a partir del modelo hidráulico Hec-Ras, ver §5. La geometría del modelo se ha modificado en la sección inmediatamente aguas arriba de donde estaba el vado (sección ID = 10497.7). Se ha considerado que la cota del tálveg en 2015 en esta sección, antes de la demolición del vado era igual a la cota del tálveg de la sección aguas arriba (sección ID = 10600.5) menos la pendiente del lecho (~ 0.0035 m/m) por la distancia entre ellas ($L = 104.8$ m). De esta operación resulta una cota del tálveg en el vado de 794.5 m (1.7 m superior a la de la misma sección en 2017, fecha de la topografía del modelo Hec-Ras). Se ha impuesto esta cota resultante a todos los puntos de la sección transversal del vado con cota inferior. La cota del tálveg en la sección inmediatamente aguas abajo del vado (sección ID 10458.1), situada apenas 40 m aguas abajo de la sección superior no se ha modificado y mantiene la cota del tálveg igual a 793.57. La

altura del salto es pues de 0.9 m. Este valor es la cota superior de la pérdida de energía en el salto.

Tabla 20. Caudales selecciones de la curva de caudales de caudales clasificados y resultados de la potencia y la energía disipada en el salto del antiguo vado entre julio de 2015 y noviembre de 2017. La pérdida de carga H se ha calculado a partir de los resultados del modelo Hec-Ras.

día	Q	H	Potencia	Energía disipada en un día	Energía disipada en cada Dti	% energía disipada
	(m ³ /s)	(m)	(kW)	(MWh)	(MWh)	(-)
1	188.3	0.61	1126.6	27	-	
6	158.9	0.62	966.6	23	126	7.6%
12	133.5	0.63	824.8	20	129	7.8%
13	112.6	0.62	684.9	16	18	1.1%
19	94.6	0.58	538.1	13	88	5.3%
29	77.9	0.54	412.8	10	114	6.9%
37	66.4	0.50	325.9	8	71	4.3%
60	51.7	0.45	228.1	5	153	9.2%
96	41.9	0.42	172.7	4	173	10.5%
163	31.4	0.4	123.2	3	238	14.4%
212	20.7	0.38	77.2	2	118	7.1%
404	8.0	0.35	27.5	1	241	14.6%
853	1.5	0.50	7.3	0	187	11.3%
Total:					1656	

La Tabla 20 ilustra los resultados obtenidos del cálculo de la potencia y de su integración temporal para obtener la energía total disipada durante el periodo entre julio de 2015 a noviembre de 2017. La potencia disipada aumenta con el caudal (obsérvese en la ecuación superior que la potencia es directamente proporcional al caudal). Esto hace que la energía disipada durante un día de crecida (recordemos que el hidrograma de la Figura 3 como la curva de caudales clasificados de la Figura 4 se han elaborado a partir de caudales medios diarios) sea mucho mayor que en caudales bajos. Sin embargo, como estos caudales son mucho más frecuentes que las crecidas, la energía disipada por ellos es comparable o incluso mayor. Así por ejemplo, los caudales inferiores a 8 m³/s han disipado un 11% de la energía total mientras que los seis mayores caudales medios diarios (Q > 159 m³/s) han contribuido en menos del 8% a la

disipación total de energía en los más de 850 días del periodo considerado. Los caudales inferiores a 52 m³/s (que representaron el 93% del periodo de estudio) contribuyeron en casi un 60% a la energía total disipada en el salto.

Las conclusiones de este apartado son que el retroceso del salto al pie del antiguo vado demolido en 2015 es un proceso que, a diferencia del transporte sólido de fondo que requiere de caudales elevados (crecidas), ocurre para todo el abanico de caudales esperables. Como los caudales bajos son más frecuentes que los asociados a eventos de crecida, son estos caudales bajos los que más contribuyen proporcionalmente al retroceso del salto.

El frente del salto está situado, según la ortofoto de 2017, Figura 21, unos 60 m aguas abajo de la última traviesa. Si el ritmo del retroceso se mantiene como hasta ahora, el frente del salto alcanzará la última traviesa de la canalización en 2 años. Pensamos que los resultados de este apartado son aplicables al retroceso de cualquier salto que pueda producirse en el tramo estudiado del Bernesga donde el manto aluvial superficial se haya agotado y el zócalo arcilloso quede expuesto.

16 PRONÓSTICO DE LA EROSIÓN Y MEDIDAS CORRECTORAS

16.1 Análisis del perfil longitudinal prístino

En primer lugar analizamos si el perfil longitudinal prístino está realmente inalterado. Las conclusiones de este análisis nos permitirán obtener relaciones entre las variables que controlan el equilibrio fluvial que nos servirán para el pronóstico de la erosión y para la propuesta de medidas de gestión de la incisión del Bernesga.

La expresión básica que debemos usar establece cuál debe ser la relación entre la pendiente y la anchura del cauce para que el río esté en equilibrio, es decir para que pueda transportar el material suministrado desde aguas arriba y no se acumule. Esta expresión, que se obtiene de la analogía de la balanza de Lane establece que el cociente S^2/B debe ser constante.

Analizamos el extremo superior del Bernesga de 1956. Este sector es el que, dada la fecha y la lejanía a la Ciudad de León, es más probable que esté en equilibrio. La pendiente y la anchura de 1956 en este tramo son:

Tabla 21. Anchura de 1956 y pendiente del perfil prístino (Figura 66) de los dos tramos del Bernesga en su extremo superior.

tramo	inicio	final	Coord. (m)	L (m)	B (m)	S (m/m)	S²/B (1/m)
1	Arroyo de Valdeposadas	Carbajal de la Legua	26486	5435	233	0.0040	6.8·10 ⁻⁸
2	Carbajal de la Legua	Final Actuacion 2009, TM León	21233	5070	237	0.0039	6.3·10 ⁻⁸

Los valores del cociente S^2/B son muy parecidos (Tabla 21). El valor medio de ambos es $6.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$. Hacemos la hipótesis, fundada en la analogía de la balanza y en que no ha cambiado el régimen hidrológico ni la aportación de sedimentos, de que este valor de S^2/B expresa la relación que deben cumplir la pendiente y la anchura del Bernesga en equilibrio.

Analizamos ahora el posible equilibrio fluvial del tramo central, entre los puentes de San Marcos y de los Leones. Este tramo es el que ya en 1956 parecía más estrecho de lo que debiera si estuviese en equilibrio (Figura 58). La pendiente del tramo en 1956 era 0.0037 m/m (si usamos, por coherencia, el perfil longitudinal prístino obtenido sin desagregar los datos de 1910, 1912-25, y 1933). Como se ha dicho antes, el cociente S^2/B debe permanecer constante en equilibrio. Esto significa que

$$\left(\frac{S^2}{B}\right)_A = \left(\frac{S^2}{B}\right)_B$$

indicando los subíndices A y B el extremo superior del Bernesga en equilibrio y del tramo entre puentes. Tomando el valor de la relación de S^2/B en equilibrio podemos despejar de la expresión anterior el valor de la anchura que debería tener el tramo central en León para estar en equilibrio. Esta anchura resulta 211 m. Este valor es un poco mayor que los 175 m estimados en el apartado §10. Recordemos que este valor se ha obtenido sin poder ver el límite de las

secciones transversales por la margen derecha. Es decir que como se ha dicho más arriba, podría ser un mínimo de la anchura del cauce anterior a la primera canalización de 1911. El resultado obtenido nos parece una buena aproximación que cuál debiera de ser la anchura prístina del Bernesga en León.

Haciendo la misma operación en el tramo entre el puente de la N-630 y la confluencia con el Torío, la anchura en equilibrio con el perfil longitudinal prístino (aquí con una pendiente $S = 0.0036$ m/m) es 204 m. Esta anchura del cauce es un 25% mayor que la observada en 1956 (156 m).

Hacemos la misma operación para el tramo del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío. La anchura y la pendiente medias del tramo entre la confluencia y el vado (o el final de la canalización de 1983) son: 543 m y 0.0035 m/m. Sin embargo, la entrada del Torío hace que no podamos usar la expresión anterior, ya que era propia de un tramo con un caudal (dominante) determinado, menor que el caudal (dominante) después de la confluencia de los dos ríos. La expresión anterior se ha obtenido de la analogía de la Balanza de Lane:

$$Q_s D^{3/2} \propto \frac{Q^2}{B} S^2$$

Definimos el caudal dominante del Torío Q_T en función del caudal del Bernesga Q_B como

$$Q_T = \alpha Q_B$$

α es un valor que debiera de estar próximo a la unidad ya que las cuencas de ambos ríos tienen una superficie similar.

Si aplicamos la relación anterior al Bernesga en los tramos aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío, es el cociente siguiente el que debe conservarse para asegurar el equilibrio fluvial es

$$(1 + \alpha)^2 \frac{S^2}{B}$$

El coeficiente α se puede calibrar para que, con los datos de anchura de 1956 y de pendiente media observada (la prístina) en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Bernesga, se mantenga el Bernesga en equilibrio. La condición que debe cumplirse es

$$\left((1 + \alpha)^2 \frac{S^2}{B} \right)_A = \left(\frac{S^2}{B} \right)_B$$

donde, ahora los subíndices A y B hacen referencia al tramo aguas abajo y aguas arriba de la confluencia con el Torío. Las medias ponderadas de la anchura y la pendiente del Bernesga en 1956 en el tramo entre las confluencias con el Torío y el Esla (tramo A) son 411 m y 0.0034 m/m, respectivamente y si se usa la anchura y la pendiente de 1956 en el extremo superior del Bernesga como punto B, también conocidas, se obtendría despejando un valor de $\alpha = 0.53$. Usando los caudales dominantes de ambos ríos obtenidos en §9.1, ($Q_B = 162$ y $Q_T = 146$ m³/s) el valor resultante es $\alpha = 0.90$. Cabe recordar que, según se ha visto en §9.1, mediante la suma de estos caudales dominantes se obtiene cota superior del caudal dominante aguas abajo de la confluencia con el Torío. Un caudal dominante en este último tramo menor resultaría en un menor valor de α . En cualquier caso, con este último valor de $\alpha = 0.9$, la anchura del Bernesga aguas abajo de la confluencia con el Torío en el año 1956, en condiciones de equilibrio, debería de ser 640 m. Esta anchura es un 18% mayor que la anchura Bernesga en 1956 del tramo entre la confluencia con el Torío y el vado (Tabla 15) y un 55% mayor que la anchura media de los 12.6 km aguas abajo de la confluencia con el Torío hasta el Esla, calculada anteriormente e igual a 411 m.

La relación anterior asume que el Torío no aporta sedimento al Bernesga, lo cual representa una primera aproximación. Si vamos un paso más allá, podemos, por el contrario, definir el caudal sólido aportado por el Torío al Bernesga $Q_{s,T}$ en función del aportado por el Bernesga $Q_{s,B}$:

$$Q_{s,T} = \beta Q_{s,B}$$

En estas condiciones, la analogía de la balanza de Lane nos indica que el equilibrio del tramo aguas abajo de la confluencia debe satisfacer la siguiente relación

$$(1 + \beta)Q_s D^{3/2} \propto (1 + \alpha)^2 \frac{Q^2}{B} S^2$$

Donde $(1 + \beta)Q_s$ es el caudal sólido aportado al tramo y $(1 + \alpha)Q$ es el caudal líquido total. Los dos elementos representan, respectivamente, la suma de los caudales (sólido y líquido) aportados por el Bernesga y el Torío. Operando con la expresión anterior para agrupar todos los términos que no cambian (Q_s , Q y D) se obtiene que la relación que debe mantenerse constante es en realidad

$$\left(\frac{(1 + \alpha)^2 S^2}{1 + \beta} \frac{S^2}{B} \right)_A = \left(\frac{S^2}{B} \right)_B$$

en la que, igual que antes, A representa el tramo del Bernesga aguas abajo de la confluencia y B un tramo del mismo río pero aguas arriba de la unión con el Torío. Da igual qué tramo aguas arriba se elija; la única condición es que las variables en el tramo estén en equilibrio. Obsérvese que esta expresión es una generalización de la anterior, la cual se obtiene de considerar $\beta = 0$ en esta última. Falta sólo definir el valor de β . Para ello, hacemos notar que la expresión anterior también se debe de cumplir cuando se aplica al Torío, en 1956. En este caso hay que conocer la pendiente S y la anchura B en equilibrio, en el año 1956, antes de las obras y acciones sobre el río. Aplicando la relación de este modo, el tramo B aguas arriba de la confluencia (que antes pertenecía al Bernesga, B_{Bernesga_B}) ahora pertenece al Torío, llamémosle $T_{\text{Torío}_B}$. El tramo A continúa siendo el del Bernesga aguas abajo de la confluencia, B_{Bernesga_A} . El hecho relevante para definir el valor β es que si la relación anterior debe cumplirse para el Bernesga (es decir, para la pareja B_{Bernesga_A} - B_{Bernesga_B}), que es lo que se acaba de expresar en la última ecuación, y también para el Torío (es decir, la pareja B_{Bernesga_A} - $T_{\text{Torío}_B}$), se deduce por propiedad transitiva que también se cumple entre los tramos del Torío y el Bernesga, ambos aguas arriba de la confluencia, de lo que resulta, recordando $Q_T = \alpha \cdot Q_B$ y $Q_{s,T} = \beta \cdot Q_{s,B}$:

$$\left(\frac{S^2}{B} \right)_{A \equiv \text{Bernesga}} = \left(\frac{\alpha^2 S^2}{\beta} \frac{S^2}{B} \right)_{B \equiv \text{Torío}}$$

De esta expresión se puede despejar el β que resulta:

$$\beta = \alpha^2 \left(\frac{S^2}{B} \right)_{Tor} \left(\frac{B}{S^2} \right)_{Ber}$$

en la que los subíndices *Tor* y *Ber* hacen referencia al Torío y al Bernesga aguas arriba de la confluencia. No conocemos la anchura y la pendiente en el Torío en 1956. Supongamos que tienen tanto la pendiente como la anchura del cauce iguales a las del Bernesga. En dicho caso, $\beta = \alpha^2 = 0.9 = 0.81$. Esta aproximación parece razonable dados la semejanza de los caudales dominantes de ambos ríos (ver §9.1). Si volvemos a hacer la operación anterior, comparando las dimensiones del Bernesga aguas arriba y aguas abajo de la confluencia, obtenemos que la anchura del Bernesga aguas abajo en equilibrio es de 352 m. Esta anchura es un poco inferior a la media del tramo (411 m). Sin embargo, se aproxima mejor a la anchura media del Bernesga aguas abajo del extremo inferior del tramo canalizado (385 m).

De todo este análisis demostramos que el Bernesga, excepto en los tramos centrales cerca de los puentes de San Marcos y de los Leones, en 1956 estaba en equilibrio y que el perfil longitudinal prístino describe bien este equilibrio.

16.2 Pronóstico de la evolución de la pendiente en los tramos canalizados

Con los resultados anteriores podemos determinar las pendientes de equilibrio del Bernesga ante las nuevas condiciones, principalmente el estrechamiento que han supuesto las canalizaciones. Para ello usamos la relación entre la pendiente y la anchura en equilibrio:

$$\left(\frac{S^2}{B} \right)_{1956} = \left(\frac{S^2}{B} \right)_{t \rightarrow \infty}$$

En la izquierda de esta expresión se encuentran las variables del cauce en equilibrio del año 1956 y en la derecha las del pronóstico a largo plazo. Este uso de la misma expresión básica del apartado anterior, deducida de la balanza de Lane, tiene ahora un significado diacrónico (paso del tiempo) y no sincrónico (mismo instante) como se ha hecho antes. Nótese que para aplicarla correctamente, tanto la pendiente como la anchura deben ser las asociadas al

equilibrio. Por tanto, en el tramo central entre los puentes de San Marcos y de los Leones, no se usará la anchura observada en 1956, 104 m, sino la calculada en el apartado anterior, 211 m. En la derecha de la expresión están las variables finales del tramo una vez estén en equilibrio, que en teoría se va a alcanzar dentro de algunos años. Obsérvese que la anchura de este nuevo equilibrio es la dictada por las canalizaciones actuales.

Si se tomara en cuenta una disminución del caudal sólido con el paso del tiempo, plenamente justificada por el agotamiento de las fuentes de sedimento grueso en el Bernesga, la expresión de arriba tendría Q_s en el denominador.

Actualmente, la anchura del Bernesga con lecho móvil no es la distancia entre muros (76 m) sino que varía entre 26-40 m. Es esta anchura la que debe de participar en la ecuación anterior para determinar la pendiente del cauce en equilibrio bajo las nuevas condiciones que imponen las canalizaciones. Para los tramos urbanos canalizados (Tabla 2) se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 22. Resultados de las pendientes de equilibrio $s_{t \rightarrow \infty}$ en los tramos canalizados. S_{2017} y S_{1956} denota la pendiente del lecho en 2017 y 1956 respectivamente, B_{1956} la anchura del cauce en 1956 y $B_{a,2017}$ y $B_{m,2017}$ hacen referencia a las anchuras activas y entre muros de canalización, respectivamente.

Inicio tramo	Final tramo	coord media (m)	S_{2017} (m/m)	$B_{a,2017}$ (m)	$B_{m,2017}$ (m)	S_{1956} (m/m)	B_{1956} (m)	$s_{t \rightarrow \infty}$ (m/m)
Puente San Marcos	Puente Leones	15955	0.0032	31.7	76	0.0037	211	0.0014
Puente Leones	N-630	15030	0.0036	26	76	0.0036	204	0.0013
N-630	Confluencia Torío	13543	0.0037	35	76	0.0036	204	0.0015
Confluencia Torío	Vado	11598	0.0036	40	88	0.0035	411	0.0011

Los resultados de estos cálculos arrojan un pronóstico de la pendiente menor que la actual en 2017, en promedio la pendiente de equilibrio representa tan solo un 38% de la pendiente en 2017. Esto significa que la erosión por estrechamiento no ha terminado y que progresará de forma gradual con el tiempo. La incisión futura se vería reducida si se considerara una anchura

superior a la anchura activa actual. Si en lugar de ésta última, se permitiera que el ancho activo correspondiera a la distancia entre muros, la pendiente de equilibrio sería todavía menor que la actual, es decir que aún podría esperarse una incisión, pero ésta sería menor que la que resulta del cálculo anterior (Tabla 22). En dicho caso, la pendiente de equilibrio pronosticada (igual a 0.0021 m/m) en estas condiciones representa, en promedio un 58% de la pendiente actual del Bernesga. Habría que ampliar la sección entre muros actual en 2.4 veces para estar próximos a detener la incisión. En este caso, la pendiente de equilibrio pronosticada representaría un 90% de la pendiente actual. Estas anchuras son similares a las que tenía el río en 1956.

Estas estimaciones de la pendiente de equilibrio en el futuro asumen que la potencia del estrato aluvial del cuaternario es suficientemente grande como para permitir la incisión futura. Esto no es cierto en muchos tramos donde la erosión ha agotado los depósitos aluviales y ha dejado al descubierto el zócalo del terciario. En estas condiciones, son los procesos de erosión de este material arcilloso los que controlan la incisión futura.

Como se ha comprobado anteriormente, las traviesas no detienen la incisión: desde que construyeron, alrededor de 1983 –quizá unos años antes-, el cauce del Bernesga se ha incidido en promedio 2.1 m, §14.4. Esto, como se ha explicado brevemente en el apartado §14.3, ocurre por la erosión local que se produce bajo la traviesa superior de un tramo. Ha sido esta erosión local la que ha motivado la demolición en 2017 de tres traviesas cuya cimentación había sido socavada. La erosión local desencadena una disminución de la pendiente del río entre traviesas, o sea que el perfil gire alrededor de la coronación de la traviesa situada en el extremo inferior causando una mayor incisión. La incisión entre las traviesas en lechos aluviales fue estudiada en laboratorio (Martín-Vide y Andreatta, 2009). De esta investigación, se obtuvo una expresión que permite conocer la pendiente final S' entre traviesas en función de la pendiente inicial S_0 , la pendiente de equilibrio final (si no hubiera traviesas) S_{eq} y la distancia entre traviesas L (Figura 82):

$$S' = 0.08S_0 + 0.92S_{eq} - \frac{\beta}{L}$$

en la que β aquí es una constante, que para ríos efímeros y torrenciales se ha calibrado entre 0.115 – 0.175. En la ecuación anterior, S_{eq} denota la pendiente final de equilibrio a la que el río tenderá en las condiciones actuales. Es decir, para el caso del Bernesga, se trata de la pendiente $s_{t \rightarrow \infty}$ que se ha calculado anteriormente. Obsérvese que, si la distancia entre traviesas disminuye lo suficiente, puede volverse mayor que los dos primeros miembros de la derecha de la ecuación y conducir a una pendiente entre traviesas negativa (contrapendiente). Esto es lo que sucede en el Bernesga (Figura 61).

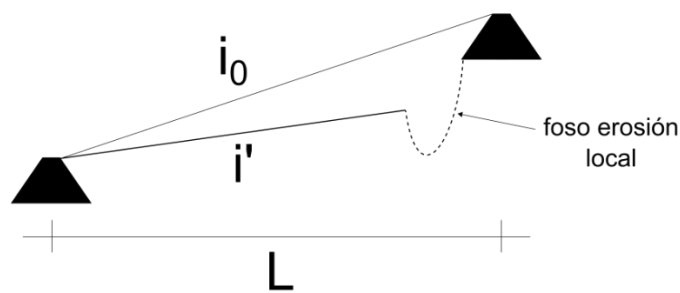


Figura 82. Esquema de las variables involucradas en el cálculo de la pendiente final entre traviesas. i_0 e i' son S_0 y S' en la ecuación anterior.

Las pendientes medias entre traviesas para los tramos entre el puente de la N-630 y la confluencia con el Torío y de este punto hasta el final de la canalización resultan -0.0088 m/m y -0.0060 m/m, respectivamente. Obsérvese que la pendiente es menor (mayor contrapendiente) en el tramo superior que en el inferior y que la distancia entre traviesas en ambos tramos es entre 125 m y 160 m. Estas observaciones parecen seguir la tendencia apuntada más arriba según la cual, cuanto menor sea la distancia entre traviesas, menor es la pendiente. Si se usa el valor de β calibrado para ríos torrenciales y efímeros, la pendiente final entre traviesas para los tramos aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío es 0.00041 m/m y 0.00038 m/m. Es decir que se obtienen pendientes menores que las de equilibrio pero sin llegar a ser negativas, como las observadas en 2017. Podría pensarse que las condiciones del transporte sólido, de la hidrología, de la morfología (anchuras, pendientes), etc. propias del Bernesga son muy distintas que las asociadas a ríos efímeros mediterráneos con los que se ha deducido el valor de β . Un cálculo inverso, permite, dadas las pendientes actuales entre traviesas, calcular

el valor de β que las reproduce. Este valor, común para los dos grupos de traviesas (siendo la confluencia con el Torío la separación entre ambos) es 1.19, es decir unas 10 veces más que para los ríos efímeros. Nótese que esta hipótesis de cálculo asume que la pendiente actual representa en realidad la pendiente a la que tendería el perfil entre traviesas. Si la pendiente actual no se correspondiera con la pendiente final entre traviesas, es decir que el Bernesga en este tramo está todavía ajustándose a las “nuevas” condiciones (estrechamiento + traviesas), esto querría decir que la pendiente final es todavía menor (mayor contrapendiente). A este resultado se llega incrementando el valor del coeficiente β .

16.3 Pronóstico de la evolución de la pendiente en los tramos no canalizados

Con las mismas ideas del apartado anterior, podemos estimar las pendientes futuras del Bernesga de los tramos no canalizados considerando que la anchura futura del cauce en equilibrio corresponde a la anchura de 2017. Como antes, la igualdad que debe satisfacerse es

$$\left(\frac{S^2}{B}\right)_{1956} = \left(\frac{S^2}{B}\right)_{t \rightarrow \infty}$$

Como estamos comparando las variables que controlan el equilibrio en un mismo tramo pero en dos instantes distintos, no hace falta tener en cuenta los aumentos de caudal líquido (y sólido) aguas abajo de la confluencia con el Torío. Estos caudales aparecen a los dos lados de la igualdad y se cancelan. La Tabla 23 ilustra las variables involucradas en el cálculo y el resultado de las pendientes pronosticadas para los tramos no canalizados del Bernesga.

Tabla 23. Resultados de las pendientes pronosticadas en los tramos del Bernesga no canalizados.

Inicio tramo	Final tramo	coord media (m)	S ₂₀₁₇ (m/m)	B ₂₀₁₇ (m)	S ₁₉₅₆ (m/m)	B ₁₉₅₆ (m)	S _{t→∞} (m/m)
Arroyo Valdeposadas	Puente Carbajal de la Legua	26,552	0.0049	38	0.0040	235	0.0016
Puente Carbajal de la Legua	Azud de San Marcos	19,950	0.0044	33	0.0038	190	0.0016
Vado	Puente de Alija	8,297	0.0022	29	0.0034		9.5·10⁻⁴

Puente de Alija de la Ribera	de la Ribera					8.9·10⁻⁴
	Esla	3,066	0.0019	40	0.0028	

Los resultados del cálculo proporcionan unas pendientes futuras menores que las actuales. La reducción de la pendiente es proporcionalmente mayor en los tramos aguas arriba de León que en los del extremo inferior. Este resultado nos confirma que la incisión en estos últimos tramos se ha desarrollado más que en los tramos superiores. Esto significa que la incisión tiene pues un mayor recorrido en los tramos superiores. Para el cálculo de las pendientes pronosticadas para el futuro equilibrio del Bernesga se asume que la anchura del cauce permanece igual a la actual. Esto no tiene por qué ser así: en realidad, se ha observado que el cauce se estrecha a medida que se incide. Anchuras futuras del cauce menores que las actuales resultarían en pendientes de equilibrio aún menores (se podría esperar una incisión futura todavía mayor).

Es importante destacar que este pronóstico de la pendiente asume que el lecho del cauce es aluvial y que el equilibrio del perfil longitudinal se alcanza como resultado de procesos de transporte, erosión y sedimentación en lecho aluvial. Esta condición (lecho aluvial) no se cumple en los tramos aguas abajo de León ni en gran parte del tramo aguas abajo del puente de Carbajal de la Legua. Las menores pendientes pronosticadas en dichos tramos indican pues que la incisión no se ha detenido. Pensamos que en el futuro se pueden alcanzar pendientes menores a la actual sin llegar a los extremos pronosticados en la Tabla 23.

El mismo razonamiento es válido para el tramo superior, aguas arriba del puente de Carbajal de la Legua. Aunque en el extremo superior no se ha agotado el material aluvial, pensamos que su espesor no es suficiente como para que se desarrolle la pendiente de equilibrio de la Tabla 23. Así, la pendiente futura en este tramo y en equilibrio con la anchura actual debería de ser menor que la actual pero algo mayor que la pronosticada.

16.4 Resumen del pronóstico del perfil longitudinal

Este apartado tiene por objeto resumir en la Tabla 24 los resultados de las pendientes pronosticadas de los distintos tramos del Bernesga. Se trata sólo de agrupar los resultados de

las Tabla 22 y Tabla 23. Hacemos notar que las pendientes de los tramos con traviesas en la Tabla 24 son las que resultan del equilibrio entre la anchura, pendiente y caudales líquido y sólido. Es decir, que no son las que se obtienen de tomar en consideración el efecto que la sucesión de traviesas tiene sobre el perfil longitudinal, ver §16.2.

Tabla 24. Resumen de las pendientes prístinas, actuales (2017) y pronosticadas para los distintos tramos del Bernesga. La columna de la incisión media se ha obtenido a partir de los resultados de la Tabla 16.

Inicio tramo	Final tramo	$S_{prístina}$ (m/m)	S_{2017} (m/m)	Incisión media (m)	$S_{pronóstico}$ (m/m)
Arroyo Valdeposadas	Puente Carbajal de la Legua	0.0040	0.0049	+0.1	0.0016
Puente Carbajal de la Legua	Azud de San Marcos	0.0038	0.0044	-4.5	0.0016
Azud de San Marcos	Puente de los Leones	0.0037	0.0032	-4.5	0.0014
Puente de los Leones	Puente N-630	0.0037	0.0035	-7.4	0.0013
Puente N-630	Confluencia Torío	0.0036	0.0035	-7.4	0.0015
Confluencia Torío	Vado	0.0035	0.0035	-7.7	0.0011
Vado	Puente de Alija de la Ribera	0.0034	0.0022	-8.7	$9.5 \cdot 10^{-4}$
Puente de Alija de la Ribera	Esla	0.0028	0.0019	-6.9	$8.9 \cdot 10^{-4}$

El perfil longitudinal futuro del tramo inferior depende de la evolución del tálveg del Esla en la confluencia con el Bernesga. Si el Esla continúa incidiéndose, además de una basculación de la pendiente se producirá un descenso de la cota inferior que tirará del resto del tramo hacia abajo ocasionando más erosión. Pensamos que la presencia de lecho rocoso en el Esla en la zona de la confluencia con el Bernesga representa un freno, aunque no total, como se ha visto en el Bernesga, a su erosión. Esta presencia de roca supone pues también un freno a la incisión del Bernesga en el tramo aguas abajo del puente de Alija de la Ribera. Un estudio de las causas y del alcance de la incisión del Esla podría señalar las futuras tendencias de la evolución de su perfil longitudinal que a su vez ayudarían a ajustar el pronóstico de la erosión en el tramo inferior del Bernesga.

La solera del puente de Alija de la Ribera y la base del azud de San Marcos hacen que la pendiente en sendos tramos aguas arriba bascule o rote entorno a estos puntos fijos, que no pueden descender. Ahí, la reducción de la pendiente (en línea de trazos de color verde claro) obedece al equilibrio futuro del cauce con la anchura actual y asumiendo que 1) los caudales líquidos y sólidos no cambian y 2) el espesor aluvial permite alcanzar dichas pendientes. Esta última hipótesis no se cumple en el tramo inmediatamente aguas arriba de León. Es por eso que se añaden, como más arriba, los perfiles longitudinales en verde oscuro. Se trata de perfiles longitudinales asociados a una fase intermedia entre el perfil actual y el futuro en equilibrio. La presencia del zócalo de roca aguas arriba de León y el escaso espesor de aluvial en el extremo superior del tramo de estudio nos inclinan a pensar que estos perfiles representan un estado futuro más verosímil que el dibujado por los perfiles en verde claro.

16.5 Medidas correctoras de la incisión

Las causas de la erosión del Bernesga son, en orden de importancia, los estrechamientos causados por las canalizaciones, las extracciones de material del lecho y los acortamientos de longitud que han supuesto las obras de canalización. A estas acciones habría que añadir los efectos regresivos del descenso de la cota del Esla por su propia dinámica (extracciones que se hayan podido llevar a cabo en el Esla o efecto de sus presas) y una reducción paulatina de la aportación sólida de la cuenca por el cambio de usos del suelo.

Para detener la incisión a fin de que el Bernesga recuperara el dinamismo de antaño, atendiendo a las causas citadas, habría que:

- a) atacar la causa principal, es decir el estrechamiento, esto es: habría que devolver al río el espacio que ha ocupado la urbanización y la explotación forestal. Habría que **ganar anchura aluvial**.
- b) en segundo lugar, cabría atacar el déficit de material debido a las extracciones del pasado, pues se ha mostrado, a propósito del rebaje del azud de San Marcos, que el río puede transportar el material aluvial. Es decir, se podría **añadir material al río**. En este caso, habría que aplicar también medidas para tratar de que el material no se escapara inmediatamente del Bernesga hacia el Esla.

Se ha comprobado en este trabajo que la evolución del Esla y del Torío también influyen en la dinámica del Bernesga. En este sentido, no cabe pensar en actuaciones solo en el Bernesga para una restauración completa del río; habría que actuar también sobre los ríos Esla y Torío, en el mismo sentido que en el Bernesga.

El entorno urbano de León, sin apenas espacio entre los muros de la canalización y la trama urbana de la ciudad (aplicable a los ríos Bernesga y Torío) así como la presas en el Esla (sobre todo Riaño, cuyo efecto en la confluencia con el Bernesga pensamos que todavía no se ha hecho sentir del todo), nos hacen pensar en una recuperación muy difícil de la dinámica del río. La dificultad para que el río recupere su dinamismo está relacionada con lo costoso de las acciones que cabría emprender para la completa restauración del Bernesga. Quizás es más apropiado en el corto plazo la propuesta de medidas encaminadas por lo menos a frenar la incisión que, como se ha mostrado, todavía no se ha detenido. Corregir la incisión e intentar revertirla son dos grados diferentes del objetivo de las medidas que se proponen.

Las medidas se concentran en los tramos del Bernesga a su paso por la Ciudad de León y en los tramos cercanos al extremo superior del tramo de estudio. Los motivos de este enfoque son que: 1) son los tramos urbanos donde una continuación de la incisión aumenta más el riesgo de socavación de las estructuras que cruzan el río, y 2) es el tramo superior con menor incisión

donde el cauce todavía conserva cierto dinamismo. La menor incisión del tramo superior hace que tanto el lecho como las llanuras estén formados por material aluvial. Este material es el que podría participar en esta estrategia de recuperación fluvial del Bernesga. Recuérdese que la magnitud de la incisión en los tramos medios (entre el puente de Carbajal de la Legua y la Ciudad de León) e inferiores (aguas abajo de la canalización de 1983) ha hecho que los depósitos aluviales casi se hayan agotado y que, en gran medida, el Bernesga discurra sobre el zócalo terciario descubierto y erosionado por el flujo falto de sedimento. Esto hace que las llanuras de inundación se hayan convertido, en la práctica, en terrazas totalmente inaccesibles para el agua. No obstante, también cabe alguna actuación en el tramo inferior totalmente erosionado.

En el apartado §14.4 se ha descrito el papel de las pequeñas irregularidades del fondo arcilloso, erosionable y con gran cohesión, en favorecer o provocar un proceso conjunto de estrechamiento e incisión. Pensamos que un ensanchamiento del cauce en estas zonas (p.e. cerca de donde se tomó la fotografía de la Figura 11) podría ralentizar de forma temporal la incisión en curso en el tramo. Sin embargo, creemos que el flujo de aguas encontraría nuevas irregularidades del sustrato que volverían a desencadenar la auto-incisión. Es por este motivo por el que creemos más conveniente actuar en tramos superiores para abastecer el río con material procedente de las márgenes aluviales que todavía conserva en esas áreas.

A) ACTUACIÓN EN EL TRAMO SUPERIOR

La actuación consistiría en hacer posible que el río en el extremo superior del tramo de estudio pueda erosionar sus márgenes. Se trata de devolver al Bernesga las zonas adyacentes, desde aproximadamente la coordenada $s = 24$ km (un poco aguas arriba del puente de Carbajal de la Legua) hacia arriba hasta el inicio del tramo, es decir en una longitud de unos 5 km. Estas zonas formaban parte del cauce en 1956 y hasta 1977 estaban ocupadas por vegetación primicolonizadora (ver Anejo A). La Figura 84 ilustra la extensión de las áreas que deberían de poder ser erosionables. Actualmente y como puede verse en la figura, estas áreas están ocupadas por plantaciones de silvicultura. La actuación podría dividirse en dos fases. Durante la

primera, que denominamos *fase pasiva* se trataría de no proteger las márgenes del cauce de modo que el río pudiera erosionarlas, ganar anchura y con ello suministrar material sólido a tramos inferiores. Como se ve, las dos maneras de remediar el problema (ganar anchura y aportar material aluvial) se conjugan de este modo. Concretamente, habría que retirar cualquier defensa de orilla que haya en la extensión de la Figura 84 (un ejemplo en Figura 85). Como hemos sabido que las explotaciones silvícolas son privadas, sería muy conveniente un plan de información a los propietarios y, eventualmente, un acuerdo sobre compensaciones en caso de perder terreno. Es una suerte en este sentido que un área tan importante de los confines del cauce principal tenga un uso productivo de menor valor, relativamente a otros usos agrícolas, y por ello habría que estar atentos a que estos suelos no cambien de uso (que no se urbanicen, que no se conviertan en regadío, por ej.). La misma acción convendría que se explorara aguas arriba del arroyo de Valdeposadas, en donde acaba nuestro tramo de estudio. Este límite superior de estudio es arbitrario en cualquier razonamiento de dinámica fluvial y transporte sólido. Que la idea de facilitar que el río tome sedimento de sus orillas tenga éxito depende de que también más arriba del límite el río pueda trabajar del mismo modo.

En función del éxito de la primera fase, es decir de la superficie ganada por el río, podría llevarse a cabo una segunda fase. Esta se realizaría si la fase anterior no hubiera conseguido, después de algunas crecidas, los efectos deseados. La segunda fase, más ambiciosa (*activa*), consistiría en rebajar un cierto espesor del nivel de las áreas delimitadas e introducir este volumen de forma gradual al cauce. Las superficies delimitadas en amarillo ocupan 71 ha. Es decir que con un rebaje de 1 m del espesor superficial se podría suministrar unos 700,000 m³ de material (incluye la porosidad) al Bernesga. Como se ha visto en apartados anteriores, este volumen es del mismo orden de magnitud que el volumen de material extraído desde 1987. Hacemos notar que el volumen de sedimento perdido (erosionado, pero también el excavado en algunos tramos) podría alcanzar unos 4.4 millones de m³ (considerando que la anchura del Bernesga que se ha incidido coincide con la actual, unos 30 m). También podemos apreciar que es afortunada la circunstancia de que estos suelos sean probablemente aluviales, como se ve en las fotos de 1956, y por ello presuntamente no contaminados. No obstante, habría que analizar su composición. Si contuvieran escombros de construcción inertes (ladrillo, mortero...)

también se podrían agregar al río. Espesores inferiores a 1 m también serían interesantes y observemos que esto se puede hacer con una mínima afectación a las explotaciones silvícolas.

Además de las orillas del Bernesga, en la visita al tramo superior se han reconocido varios arroyos o torrentes por la margen derecha, que bajan de unas lomas (Figura 85), el último de ellos el arroyo de Valdeposadas. Todos ellos son efímeros, tienen pendiente considerable y dejan depósitos en abanico bastante extensos, atravesados por un cauce (o más de uno). Estos torrentes pueden tratarse como fuentes de material granular. Por ello, se podrían desbrozar y labrar para hacer su material más móvil y por ello más al alcance del río, en caso de activarse el torrente con precipitaciones importantes. El desbroce y labrado tendría más interés cuando la vegetación hubiera ocupado los torrentes.

En algunos tramos de la visita se ha distinguido un camino que podría estar algo elevado respecto a los campos de cultivo y el río, a modo de mota (ver Figura 84b). Estos caminos se podrían rebajar de cota, proporcionando de nuevo el material al río. Normalmente, se trata también de material aluvial y no contaminado.

Habría que evitar las barreras al movimiento de este material aportado al río en el tramo superior. Parece que el azud de Sariegos no es importante a este respecto (habría que asegurar que se le quita el suplemento de altura a menudo). El azud de San Marcos es más importante y ya se ha hecho el esfuerzo de rebajarlo. Pero también, en sentido contrario, habría que fomentar la permanencia del material aportado al río en los tramos más críticos entre el puente de Carbajal de la Legua y León (por ej. la foto de portada de este informe). Lo que se puede hacer en estos tramos se describe más tarde, a propósito del tramo inferior.

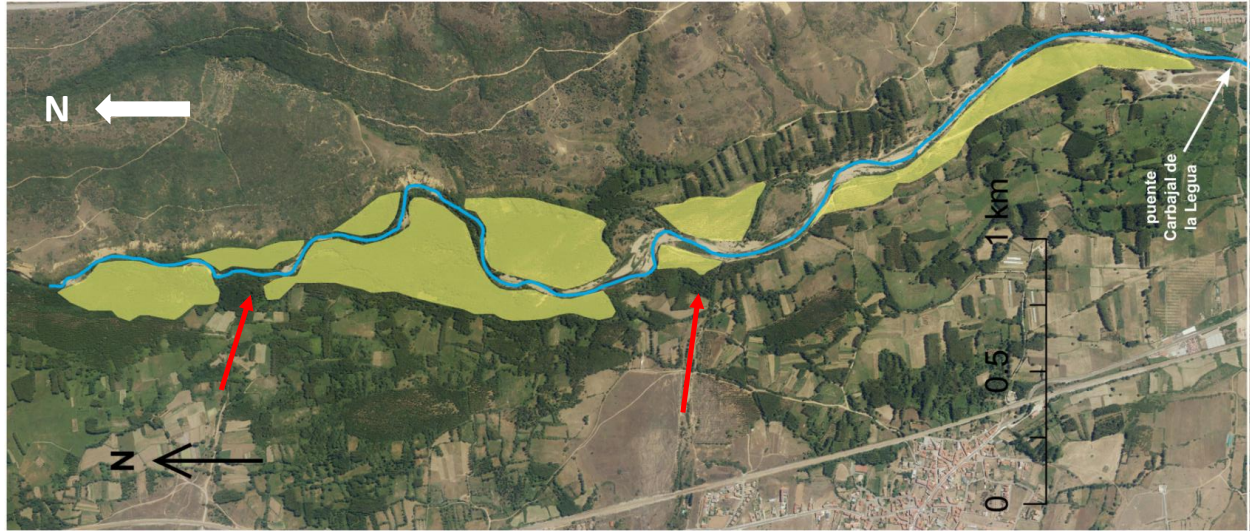


Figura 84. (arriba) Ubicación de las áreas recuperables para el Bernesga. Dos arroyos principales se señalan con flechas. (abajo) Foto 1-X-2018. Camino al borde del río (el cual se encuentra a la derecha de la foto) en un punto de bifurcación con una especie de mota a la izquierda (véase el campo verde de cultivo más a la izquierda). La vegetación entre el camino de la derecha y la mota es el comienzo de una explotación silvícola. Este es el ejemplo de un punto en que parece posible el tipo de aportación de material granular al río.



Figura 85. Desembocadura de uno de los torrentes de la margen derecha (vista hacia aguas abajo del río Bernesga, que se ve a la izquierda). Foto 25-X-2018. Llevaba algo de agua y unas protecciones de escollera jalonaban el camino, protecciones que habría que retirar como hemos dicho. Habría que informar a quien pueda pasar por este camino de la nueva gestión para favorecer la llegada del sedimento al río, pues el acceso rodado podría ser imposible si se aplican estas medidas. Ya hoy el acceso rodado es arriesgado: el coche del fondo no se atrevió a pasar.

B) ACTUACIÓN EN EL TRAMO URBANO

En el tramo urbano nos encontramos con tres intervenciones: a) el rebaje del azud de San Marcos en 2014 con la puesta en movimiento de las gravas a que ha dado lugar; b) el efecto del azud de la central hidroeléctrica, cuestión que se relaciona con la anterior y c) las traviesas.

Parece, en primera instancia, que atacar la causa principal de la incisión ganando espacio sea imposible en el tramo urbano. No es exactamente así. Lo que sucede es que los usos en el interior del cauce entre muros (usos de ocio, sobre todo), así como, eventualmente, las infraestructuras o servicios enterrados, hacen muy complejo, costoso y quizá impopular ganar anchura entre muro y muro. En efecto, se propone hacer que la anchura de muro a muro (entre 76 m y 88 m) sea toda ella activa desde el punto de vista del transporte sólido (Figura 86). Esto implica retirar las defensas de orilla en escollera, desmontar, desbrozar y escarificar (labrar) el espacio desde las márgenes del cauce central (de unos 30 m de anchura) hasta los muros de cada lado de la canalización y, probablemente también, recortar los dos laterales más altos, en

ligera pendiente transversal, de las traviesas de hormigón, que a distancias regulares consolidan la estrechez del cauce principal y fijan las llanuras (Figura 86). Con esto se consigue que el estrechamiento real no sea tan pronunciado de modo que la pendiente de equilibrio final a la que el río tendería es unas 2.4 veces mayor que aquella a la que tendería en las condiciones actuales (recordemos, con un ancho efectivo de unos 30 m). Recordamos en este punto que una menor pendiente se traduce en más erosión del cauce: el perfil gira alrededor de su extremo inferior. Esta medida de contención de la incisión debería ir acompañada quizá de una escollera de protección, enterrada, para evitar la socavación de los muros de la canalización si existiera ese peligro.

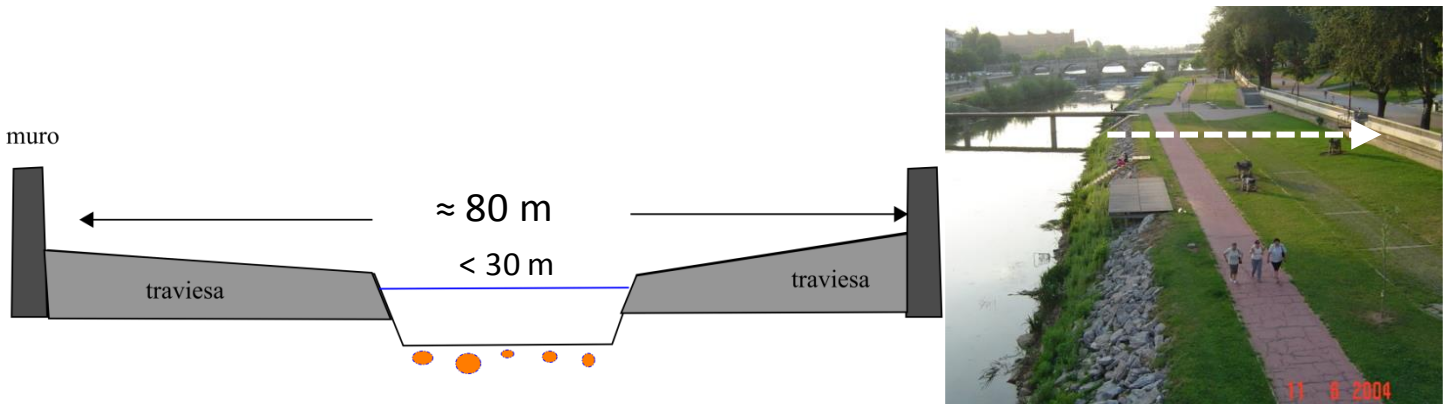


Figura 86. Croquis en sección transversal de la ganancia de anchura que se propone, haciendo aluvial toda la anchura entre muros (80 m), con la probable demolición o rebaje de las traviesas (al menos las partes sombreadas en gris). (derecha) Aplicación a un lugar céntrico de León (foto de 2004, ya presentada en la Figura 13).

La aplicación a un lugar céntrico de León (Figura 86b) significaría el sacrificio de unos lugares de ocio que en rigor no deberían haberse asentado nunca en los 80 m de anchura de un río que en estado natural tenía más de 250 m. ¿Sería un gran sacrificio desplazarlos hasta el pie del muro o, mejor aún, al otro lado del muro? No parece que esto tenga un coste desmesurado, comparado con la expectativa de recuperación morfológica del río. A lo mejor sería impopular al principio, pero no a largo plazo si se invierte en educación ambiental. Quizá es más complejo el caso de los servicios afectados, si los hay. Lo primero que habría que hacer la autoridad competente (la C.H.Duero por el dominio hidráulico y la autoridad municipal por servicios) sería

el registro de esos servicios y, en segundo lugar, el control de cualquier otra propuesta futura de uso del espacio y del subsuelo del río, a fin de no hacer cada vez más compleja y costosa la recuperación del espacio.

Pero aún se puede ser más emprendedor con la misma propuesta, pues aguas abajo del centro de la ciudad, especialmente tras la confluencia con el Torío, se encuentra el mismo esquema de canalización de la Figura 86, pero no existen estos usos del espacio entre muros ni probablemente tampoco pasen infraestructuras o servicios enterrados, o pasen muchas menos que en el centro de León. En esos lugares la medida propuesta debe aplicarse. El futuro debe ser un río aluvial de muro a muro.

El rebaje del azud de San Marcos (barrera, más bien se debería llamar) ha demostrado que el material granular del río se mueve con las crecidas. Hoy el azud rebajado es un obstáculo menos, sin apenas salto de agua, parcialmente ocupado y cubierto por las gravas. El material que había acumulado el azud, formando un depósito importante donde ha crecido mucha vegetación, se ha puesto en movimiento. Esto es bueno para el sistema fluvial, no solo para su componente morfológica sino también para el ecosistema en conjunto.

Hemos mostrado que, sin embargo, el azud de la Central Hidroeléctrica remansa la corriente y con ello propicia la interrupción del transporte de las gravas. Hoy por hoy es una barrera al transporte, que resulta más intrusiva desde que la acción contraria, rebajar el azud de San Marcos, la ha puesto en evidencia.

Hay que recordar que la central aprovechó el desnivel provocado por una traviesa, deberíamos decir aprovechó un desnivel accidental de una obra mal concebida. La Figura 4 muestra cómo era la barrera en 2004 y como es en 2018 con la central eléctrica que recreó un poco la barrera. Es cierto que como lugar de demostración de energía renovable tiene un valor educativo, más aún encontrándose en el centro de la ciudad, pero su papel de obstáculo al transporte sólido será cada vez más manifiesto. Con una escala de peces como tiene, en la margen derecha (ver Figura 4), no sabemos si tiene desagüe de fondo, como debería tener. A las presas se les exige hoy en los países avanzados la realización de purgas regulares de sedimento mediante órganos de desagüe de fondo con capacidad para evacuar crecidas

ordinarias (la operación se llama *venting* o paso de sedimento) o en régimen normal (*flushing* o purga), sin acumular el sedimento. La central del Bernesga debería someterse a esta exigencia. Los desagües de fondo construidos en el azud de la central, permiten estas operaciones (Figura 87). En la prueba que se hizo el día 27 de junio de 2017 pareció claro que el material grueso no ha llegado todavía al paramento aguas arriba del azud de la central. Es un contrasentido que una instalación de energía renovable que entre sus objetivos tiene la educación ambiental pueda descuidar esta otra componente del medio ambiente: el paso del sedimento como necesidad de mantener el equilibrio morfológico del río, base de su buen estado ecológico.



Figura 87. Vista desde la margen derecha de la apertura de un desagüe de fondo en el azud de la central hidroeléctrica. Fotografía tomada el día 27 de junio de 2019.

En tercer lugar podemos actuar sobre las traviesas. Recordemos que la distancia actual entre traviesas es 125 m y 160 m, en los tramos aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el Torío, respectivamente. Como se ha visto, cuanto menor es la distancia entre traviesas, menor es la pendiente final entre ellas, es decir, mayor es la erosión. La Figura 88 nos recuerda el perfil longitudinal del río en la zona de traviesas y nos muestra la tarea de demolición en 2018.

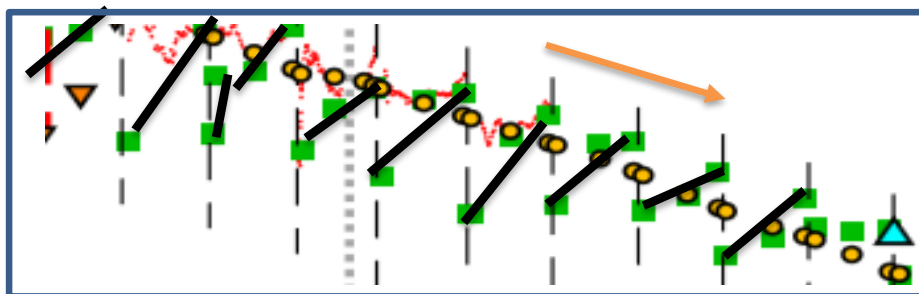


Figura 88. (Izquierda) Foto de la demolición de traviesa en curso aguas abajo de la confluencia con el Torío, el 25-X-2019. (Derecha) Detalle del perfil longitudinal de la zona de traviesas: las líneas medias (negras) tienen contrapendiente.

Por lo tanto, aumentando la distancia entre traviesas estamos contribuyendo a que la pendiente no sea tan baja. En realidad, la pendiente entre traviesas llega a ser negativa (contrapendiente, Figura 88b). Si la distancia entre traviesas se duplica (250 m y 320 m para los dos tramos, respectivamente), la pendiente final entre traviesas es mayor que la actual: alrededor de -0.0032 m/m y -0.0024 m/m para los tramos aguas arriba y aguas abajo. Esto significa que, como esta pendiente es mayor que la actual, el tálveg tendería al crecimiento. Sin embargo, hacemos notar que la pendiente continúa siendo negativa. Este cambio en la pendiente final del lecho se conseguiría mediante la demolición de traviesas de forma alterna, de cada tres una –la central-, para duplicar la distancia entre ellas. La demolición debe ser gradual, como se está haciendo hasta ahora, por ejemplo dos o tres traviesas por año. Está bien que los materiales inertes (hormigón) se machaquen hasta dimensiones de grava muy gruesa y se entreguen al río, como si fuera material aluvial, evitando sin embargo las armaduras (si sobresalen, se pueden cortar y retirarlas).

C) ACTUACIONES EN EL TRAMO INFERIOR

En el tramo inferior domina por completo el cauce erosionado en la roca terciaria, hasta tal punto que los depósitos aluviales quedan lejos del alcance del agua en crecidas ordinarias. No se puede esperar, por ello, que el río aporte sedimento grueso de sus márgenes. También por el

mismo motivo parece difícil imaginar cómo ganar anchura. Para colmo, parece claro que otro factor, el nivel de base en la desembocadura, ha propagado la incisión que haya podido experimentar el río mayor, el Esla, a su afluente, el Bernesga y pueda seguir siendo así en el futuro.

Hay que distinguir en el tramo inferior dos partes: aguas arriba del puente de Alija de la Ribera y aguas abajo del mismo puente hasta la desembocadura en el Esla. Pensamos que el puente no se puede hacer nada, sino mantener la protección.

Pensamos que hay una medida de ganancia de anchura que se debe aplicar y que de hecho ya se ha aplicado (según la reciente visita del 10 de mayo de 2019, Figura 89): la demolición de los muros de encauzamiento de 1983. La C.H.Duero ejecutó la demolición de unas decenas de metros, dejando un fragmento como testigo. El material de la demolición se arrojó al río. Estas acciones deben proseguir hacia aguas arriba. Está bien arrojar el material al río, debidamente machacado hasta porciones de grava muy gruesa. El muro testigo se debe limpiar y pintar, y colocar en él una placa o un panel educativo, es decir cuidar y significar el lugar para que no parezca un resto abandonado. El criterio de hasta dónde se puede llegar con la demolición de este muro debe estar relacionado con la vulnerabilidad a la inundación asociada a los usos del suelo. En este momento, parece que todos los terrenos de la margen izquierda a lo largo de kilómetros, desde la confluencia del Torío aguas arriba, son yermos, es decir con vulnerabilidad mínima. A continuación, es importante que se informe a los propietarios de la pérdida de protección frente a grandes inundaciones en beneficio del ecosistema fluvial, de modo que cualquier uso futuro del suelo privado que entrañe riesgos (incrementa la vulnerabilidad) deba considerar la nueva situación. Se debe convertir por tanto la nueva realidad en un hecho consumado, debidamente consignado en el registro de los espacios fluviales y su consideración legal.

Otra acción complementaria al derribo de los muros del encauzamiento aguas abajo de la confluencia con el Torío podría ser la de aprovechar el material sólido situado entre el límite del cauce con escollera y el muro, ya derribado. Este material podría ser arrojado al río. Esta operación se haría sólo si la composición y granulometría del material lo permitiera. Con ello se

aumentaría el suministro de sedimento hacia aguas abajo y se dotaría al río de un espacio mayor en esta zona donde el material que pudiera transportarse desde aguas arriba podría depositar.



Figura 89. Muro de 1983 demolido en la llanura izquierda del Bernesga (arriba) y fragmento conservado como testigo de la demolición (abajo). Fotos 10-V-2019.

Como la problemática del tramo inferior y más aún de su segunda parte, conectada con el Esla, parece ser la ausencia total de material aluvial, habría que fomentar la permanencia del material aportado al río en los tramos superiores (tanto en el superior, procedente de orillas o del rebaje de llanuras, como en tramo urbano, procedente de azudes rebajados o purgados, de

traviesas demolidas, etc.). Esto se puede ensayar con obstáculos hechos con troncos, colocados en el fondo del cauce incidido en la roca, sujetos o anclados al fondo y a las orillas. En bibliografía de ecoingeniería (usando materiales vivos o, en este caso, principalmente madera) se encontrarían ejemplos de este tipo de obra. Es posible que estos obstáculos atraparan parte del sedimento grueso en movimiento y contribuyeran a hacer crecer el obstáculo y la extensión de su efecto y así, poco a poco, se fuera recuperando un espesor aluvial en el Bernesga inferior, aunque fuera precaria. Podrían ser obras provisionales, también obras graduales con necesidad de un seguimiento y en consecuencia con una posible intensificación de la acción (más obstáculos o más altos) si se aprecia que son beneficiosas. Recordemos que el cálculo de la tensión de fondo no dice que este tramo tenga mayor capacidad de transporte que los tramos superiores, sino una capacidad parecida.

17 CONCLUSIONES

Se ha estudiado la dinámica de los últimos 30 km del río Bernesga antes de su desembocadura en el Esla con el objetivo de establecer las causas de la incisión fortísima que ha sufrido el río durante los últimos 100 años.

El Bernesga en este tramo ha sufrido incisiones medias que en algún tramo (de longitud kilométrica) se acerca a los 9 m. En otros tramos, la incisión media desde 1911 se sitúa en una horquilla entre 4 m – 8 m. Esta gran incisión ha provocado que en muchos tramos se haya agotado el material aluvial del cuaternario y que el río discorra sobre el zócalo constituido por roca arcillosa del terciario. El volumen de sedimento perdido (erosionado, pero también el excavado en algunos tramos) podría alcanzar los 4.4 millones de m³ (considerando que la anchura del Bernesga que se ha incidido coincide con la actual, unos 30 m). No existen precedentes de ríos en España que hayan sufrido una incisión de una magnitud tan fuerte y en una extensión tan grande.

La incisión no se ha detenido en ningún sector del río. Actualmente, la erosión está progresando hacia aguas arriba, afectando a zonas que todavía no se habían incidido.

La erosión generalizada del cauce ha ido acompañada de un cambio profundo en su morfología. Así, en 1956 el río tenía la morfología trenzada. Era un río muy ancho (entre 170 m y 500 m), con gran dinamismo, multitud de cauces activos y abundancia de depósitos aluviales. Por el contrario, el cauce en 2017 tiene una morfología de cauce único, muy estrecho (entre 20-45 m) y con muy poca sinuosidad. Es ya en 1977 cuando se detecta que el río ha perdido su morfología trenzada anterior. En ese momento, el Bernesga se había convertido, de forma transitoria, en un río de meandros. El cambio se había producido por la concentración del flujo por un único cauce y el consiguiente abandono de antiguos cauces activos del río trenzado. Algunos de los meandros de 1977 desaparecen en 2002 por causa de distintas obras de canalización. En 2017 el Bernesga solo conserva cierta movilidad y dinamismo en su extremo superior.

El transporte de sedimento en el Bernesga en la actualidad está muy condicionado por su morfología (cauce estrecho y profundo). Ésta hace que los tramos inferiores tengan una capacidad de transporte mayor que la del tramo superior, lo que a dificulta la permanencia de sedimento en dichos tramos. El azud de la central hidroeléctrica, en el tramo urbano de León, representa un obstáculo para el transporte sólido hacia tramo inferiores. Las estimaciones del transporte de sedimento en esta zona indicarían que actualmente el material sólido se está acumulando en el vaso del azud. La nula presencia de material aluvial grueso (a simple vista) durante la apertura de los desagües de fondo del azud del día 27 de junio de 2019 confirmarían esta apreciación.

El tramo central del Bernesga, de unos 8.1 km, ha sido canalizado por fases, terminando la primera en 1911 y la última en 2009. El primer tramo canalizado fue el comprendido entre los puentes de San Marcos y de los Leones. Durante el periodo, de casi 100 años, entre la primera y la última actuación, la canalización ha ido avanzando, afectando primero a los tramos aguas abajo del puente de los Leones hasta casi 2 km más allá de la confluencia con el Torío (esta fase terminó en 1983) para, desde 2002, centrarse en el tramo aguas arriba del puente de San Marcos (finalizado en 2009). Estas canalizaciones han supuesto una drástica reducción de la anchura. Los 5 últimos km de la canalización incluyeron la construcción de una treintena de traviesas para el control del perfil longitudinal. Por causa de las canalizaciones, el tramo del río a su paso por la Ciudad de León ha visto reducida la longitud del tálveg en 1.4 km (un 20%). La motivación principal de las canalizaciones generalizadas ha sido la expansión urbana de León.

En la segunda mitad del s. XX, coincidiendo con la fase de mayor crecimiento de la Ciudad de León, gran cantidad de material aluvial fue extraído del cauce del Bernesga. No se han conseguido los volúmenes de material extraído antes de 1987 (cuando se cree que la actividad extractiva fue más intensa). Después de 1987, se han contabilizado 680,000 m³ de material extraído. A esta cantidad hay que sumar los 440,000 m³ excavados por las obras de canalización.

Entre las causas de la incisión destaca el papel del estrechamiento por fases del Bernesga, y del acortamiento del tálveg, con efectos regresivos, y la extracción de material aluvial. A estas

causas hay que añadir la reducción de la disponibilidad de material aluvial ocasionada por la exclusión para el transporte de amplias zonas aluviales ya que quedan desconectadas del cauce. Finalmente, las dinámicas propias del Esla (y del Torío) son también causa (y efecto) de la incisión del Bernesga. Esto significa que el Esla (y el Torío) han influido en la evolución sufrida por el Bernesga, p.e. determinando el nivel del fondo en la desembocadura (el Esla) y limitando el aporte de sólidos (el Torío). Como las cuencas vertientes de los tres ríos son similares, el Bernesga también ha influido en la dinámica de los otros dos.

En principio, parece que todas las causas de incisión podrían haber actuado al mismo tiempo y en toda la extensión del río, pero no es así. La canalización más antigua en León y la datación de las primeras incisiones que siguieron a esta obra permiten individualizar (y cuantificar) el efecto de un estrechamiento en el río Bernesga, lo que se aplica con provecho a distinguir el efecto de las canalizaciones de la segunda mitad del s. XX en León y sus afueras. De manera comparable, la concentración de las extracciones de material aluvial en el tercio inferior del tramo estudiado y en ciertas décadas concretas ($\approx 1960-1987$) y la datación de las incisiones que siguieron permiten también individualizar el efecto de la explotación de áridos.

Existe una última causa de incisión. Son las propias traviesas del tramo urbano del Bernesga. Es conocido que las traviesas producen pendientes parciales menores que las pendientes de equilibrio si no se hubieran construido. Esta reducción de la pendiente se traduce curiosamente en una mayor incisión media, precisamente contraria al objetivo declarado de este tipo de obras (o sea son obras contraproducentes). En el Bernesga la reducción de pendiente ha llegado al extremo de que las pendientes parciales son negativas (contrapendientes). Se han calibrado los coeficientes de una expresión empírica que pronostica el perfil del río entre traviesas.

Se proponen varias medidas correctoras de la incisión del Bernesga. Por un lado, se propone que el propio río pueda erosionar las márgenes en su extremo superior, retirando cualquier defensa. Esta medida podría ir acompañada de una pequeña rebaja de la cota de algunos sectores de las llanuras de inundación en esta zona. El material excavado de este modo debería

ser suministrado al río para contribuir así a incrementar la aportación sólida a tramos inferiores. También se podrían activar arroyos y torrentes efímeros en la parte superior.

En el tramo urbano con traviesas, se propone hacer que la anchura de muro a muro sea toda ella activa desde el punto de vista del transporte sólido. Esto implica desbrozar y escarificar el espacio desde las márgenes del cauce central (de unos 30 m de anchura) hasta los muros de cada lado de la canalización y, probablemente también, recortar los dos laterales más altos de las traviesas de hormigón. Con esto se conseguirá frenar la incisión en el tramo entre traviesas. En segundo lugar, la central hidroeléctrica debería hacer operaciones de paso de sedimento regulares. Finalmente, también se propone en este tramo eliminar una de cada dos traviesas de forma alterna, como se está haciendo en los últimos años. Esto aumenta la distancia entre traviesas con el resultado de que la pendiente final en equilibrio entre traviesas es mayor que la actual (menos contrapendiente). Este cambio de pendiente daría como resultado una acumulación de sedimento en el tramo.

En el tramo inferior habría que demoler los muros del encauzamiento de 1983 mientras defiendan terrenos yermos y facilitar que el material aluvial pueda permanecer más tiempo por medio de obras de ecoingeniería. El material entre el cauce y el muro podría arrojarse al lecho para contribuir a aumentar el suministro de sedimento hacia los tramos inferiores del Bernesga, los más afectados por la incisión.

En vista de la magnitud de la incisión del Bernesga y de que ésta no se ha detenido en ningún tramo, pensamos que es desde cualquier punto de vista desaconsejable la prolongación hacia aguas arriba de la canalización con muros como los del actual tramo urbano. Es especialmente en dichos tramos, aguas arriba de León, donde la incisión tiene todavía recorrido. Una futura canalización en estos tramos favorecería la incisión remontante en curso, quizás incrementaría su magnitud y haría que progresara hacia aguas arriba con mayor rapidez.

Las medidas que se acaban de proponer representan la versión más tímida de la política realmente necesaria si se quiere restaurar el río Bernesga, “herido de muerte” después de una larga historia de canalizaciones abusivas (por estrechas) y de décadas de extracciones de áridos desproporcionadas. Esta política de restauración consiste en la recuperación de espacio

(anchura) del río. Si bien eso parecería inviable (más bien, muy costoso) en la ciudad consolidada, no es así en las afueras, en donde los muros de hormigón de la canalización campan sin sentido en espacios yermos o marginales.

18 INVESTIGACIÓN FUTURA

Apuntamos finalmente algunos trabajos de investigación que se pueden emprender en el río Bernesga. Partimos de la base de que es de interés para la C.H.Duero conocer cómo evolucionará el cauce del río en los próximos años, tanto si no se acomete ninguna medida de lucha contra la incisión como si se aplica alguna, como las que hemos esbozado anteriormente.

Como se ha visto, el método principal de la investigación es el análisis del perfil longitudinal del cauce principal por el tálweg. Por ello, la información básica que se necesita es una batimetría de todo el tramo de estudio. La frecuencia de este trabajo puede ser anual, aunque también menores frecuencias (bianual o trianual) se aprovecharían. Con esta información se haría un seguimiento del proceso de incisión, bien dejado a su suerte, bien analizando el efecto de las medidas tomadas. La batimetría debería ser más detallada en la cascada que está retrocediendo, por erosión de la roca del Terciario, desde el antiguo vado, y en ese lugar incluir además una topografía de lo emergido. Lo mismo, o sea más detalle y registro de lo emergido, se debería hacer al menos en los siguientes puntos de mucho interés: puentes de Carbajal de la Legua, azud de San Marcos y puente de Alija de la Ribera.

Si cada año se demuele alguna traviesa, como se está haciendo en los últimos años, una topografía detallada del estado inicial antes de comenzar la obra y del estado final (o *as built*) ayudaría a estudiar los efectos de las traviesas. También antes de empezar cada una de estas obras se propone tomar muestras para análisis granulométrico, con los criterios del párrafo siguiente. Si se plantea alguna de las medidas recomendadas en este informe, también se podría programar una investigación para registrar el estado inicial y el final (por ej. tratando de la erosión de orillas o del transporte de arroyos, etc.)

Sería necesario repetir la toma de muestras granulométricas en el cauce, buscando depósitos representativos, registrando muy bien los lugares de toma, y determinando tanto su

granulometría superficial (método de Wolman, trabajo manual) como su granulometría volumétrica (análisis en laboratorio de muestras de decenas o centenares de kilos sin cuartear).

Como se ha visto también, otro método de la investigación ha sido el análisis del transporte sólido del río. El transporte sólido es el agente de los cambios, como la hipotética recuperación del fondo del cauce o la continuación de la incisión. En este trabajo, sin embargo, este análisis es muy elemental porque se basa en un criterio, empírico, de inicio de movimiento. Valdría la pena realizar unas campañas de medida del transporte de fondo, el único de importancia en la incisión. En este caso lo difícil es medir justo cuando se presenta una crecida del río; pues no vale la pena medir con regularidad en días de flujo normal con transporte sólido muy pequeño o nulo. Por ello, sólo parece viable esta investigación, si la C.H.Duero o Tragsatec tuvieran los equipos de medida (instrumento Helley-Smith, fácil y barato de fabricar, además de una estructura de apoyo, un torno, polea y cable, y un motor con grupo electrógeno, todo lo cual podemos diseñar) guardados en León. Entonces, en unas pocas horas se podría medir, preferiblemente desde una de las pasarelas sobre el Bernesga. La UPC tiene experiencia en esta clase de investigaciones de campo.

Con independencia de lo anterior, que consiste en un enfoque euleriano del transporte sólido (o sea cuántas partículas cruzan una sección dada, en un episodio intenso), se podría llevar a cabo con facilidad una investigación del transporte basada en un enfoque lagrangiano (o sea cuánto se mueven unas partículas determinadas), mediante la colocación en el cauce de un grupo de partículas con núcleo magnético, que deberían buscarse tras el paso de una crecida. Durante la crecida no hay que estar allí midiendo, esa es la ventaja, sino sólo tras la crecida. Así podríamos averiguar, por ejemplo, hasta qué punto es cierto que las gravas soltadas al rebajar el azud de San Marcos no son capaces de superar la barrera de la central hidroeléctrica, o por ejemplo, hasta qué punto es cierto que las gravas que circulan por el cauce inferior del Bernesga van a parar inmediatamente al Esla. El Instituto INDUROT tiene experiencia en esta clase de investigaciones.

El río Bernesga con buenos datos como los que ya existen y los que se pueden conseguir se prestaría a una modelización 1D del lecho teniendo en cuenta el material granular y la roca al

mismo tiempo, siguiendo las ideas de Zhang et al. (2015). También se le podría aplicar el modelo desarrollado en la UPC y que se acaba de aplicar al río Gállego (Ferrer-Boix et al., 2019).

19 EQUIPO DE TRABAJO

Este trabajo ha sido realizado por Carles Ferrer Boix y Juan Pedro Martín Vide (UPC). Daniel Mora (Mastergeo) ha realizado la caracterización geográfica y la fotointerpretación de las áreas ocupadas por los distintos usos del suelo asociados a la dinámica de ríos. Alfredo Ollero (UZ) y Daniel Mora han participado en las visitas de campo y en las discusiones previas al comienzo de los trabajos. Agradecemos especialmente la colaboración al personal de Tragsatec (Juan Carlos Blanco Redondo, José María González Ortega y Sergio Arza) por la obtención de la información histórica necesaria para llevar a cabo el estudio y por las facilidades dadas para realizar las visitas de campo y la visita a los archivos de la CHD. Por último, queremos agradecer la colaboración a José Ignacio Santillán, Ignacio Rodríguez e Inmaculada Rodríguez (Confederación Hidrográfica del Duero) por las facilidades que nos han dado para realizar las visitas de campo y por el acceso a información de carácter histórico almacenada en sus archivos.

20 REFERENCIAS

Álvarez-Valdés y Valdés, M. (2012). *Jovellanos: Vida y Pensamiento*. Ediciones Nobel, Oviedo.

Ayuntamiento de León (1968). *Carta del Alcalde-Presidente de León al Director General de Obras Hidráulicas*.

Ayuntamiento de León (1972). *Estudio de Alineación y vialidad de un paseo en la margen derecha del río Bernesga desde el límite del Término Municipal de León hasta el puente de San Marcos*.

Azcarretazabal Mantecor, D. (1960). *Proyecto de fijación de márgenes en el río Bernesga*. Confederación Hidrográfica del Duero, Servicio Forestal (Ministerio de Obras Públicas).

Ballarín, D., Rodríguez, I. (2013) *Hidromorfología fluvial: algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos en la cuenca del Duero*. Confederación Hidrográfica del Duero, 128 p., Valladolid.

Batalla, R.J. (2003) *Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain*. *Cuaternario y Geomorfología*, 17(3-4): 79-91.

Batalla, R.J., Vericat, D., Tena, A. (2014) *The fluvial geomorphology of the lower Ebro (2002-2013): bridging gaps between management and research*. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(1): 29-52.

Beguiría, S., López Moreno, J.I., Gómez Villar, A., Rubio, V., Lana-Renault, N., García Ruiz, J.M. (2006) *Fluvial adjustments to soil erosion and plant cover changes in the central spanish Pyrenees*. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88(3): 177-186.

Bennet, S.J. (1999) *Effect of slope on the growth and migration of headcuts in rills*, *Geomorphology*, 30, 273-290.

Boix-Fayos, C., Barberá, G.G., López Bermúdez, F., Castillo, V.M. (2007) *Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain)*. *Geomorphology*, 91: 103-123.

Corral, M. (1917). Proyecto adicional al de reparación y mejora de la canalización del río Bernesga frente a León. División Hidráulica del Duero.

Fernández Iglesias, E., Fernández García, M. (2010) La movilidad de los cauces en los ríos del NO Peninsular. En Benavente, J., Gracia, F.J. (Eds.) Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008, X Reunión Nacional de Geomorfología, 211-214, SEG, Cádiz.

Fernández Ordóñez, J.A., T. Abad Balboa, P. Chías Navarro (1988). Catálogo de puentes anteriores a 1936. León. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Biblioteca CEHOPU del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). MOPU, 766 pp.

Ferrer-Boix, C. (2011). Incisión de ríos por extracción de material aluvial y por retirada de presas. Estudio matemático y experimental. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

Ferrer-Boix, C; Boix, J; Martín-Vide, J.P. Ollero, A. (2019) "Avulsion of a side-channel in a gravel-bed river. Field measurements and modelling". *Earth Surface Landforms and Processes*, en revisión.

Flores-Cervantes, J. H., E. Istanbuluoglu, and R. L. Bras (2006), Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion, *J. Geophys. Res.*, 111, F01010, doi:10.1029/2004JF000226.

Geotecnia y Cimientos (1988). Puente sobre el río Bernesga en León.

de Llanos y Silvela, L. (1940). Proyecto de construcción de un nuevo espigón en del río Bernesga en León y reconstrucción de un muro en la margen derecha. Confederación Hidrográfica del Duero.

Lobera, G., López Tarazón, J.A., Batalla, R.J., Vericat, D. (2012) Efectos de una extracción severa de gravas sobre la geomorfología, la movilidad del lecho y la distribución de hábitats en el río Ésera. En González Díaz, A. (Coord.) Avances de la geomorfología en España 2010-2012, XII Reunión Nacional de Geomorfología, 529-532, SEG, Santander.

López de Soseaga y Lapeña, L.M. (1965). Proyecto de canalización del río Bernesga en Término de Onzonilla (León). Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Obras Públicas.

Martín-Vide, J.P. (2007). Ingeniería de ríos. Edicions UPC. Barcelona.

Martín-Vide, J.P. y A. Andreatta (2009). Channel degradation and slope adjustment in steep streams controlled through bed sills, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 38–47.

Martín Vide, J.P., Batalla, R.J., Roca, M., Rovira, A., Andreatta, A. (2005) Incisión, erosión transitoria y formas de fondo en los tramos medio y bajo del río Tordera. *Ingeniería del Agua*, 12(1): 53-62.

Martín Vide, J.P., Ferrer-Boix, C., Ollero, A. (2010) Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117: 261-271.

Mas-Pla, J., Montaner, J., Solà, J. (1999) Groundwater resources and quality variations caused by gravel mining in coastal streams. *Journal of Hydrology*, 216: 197-213.

Núñez, F., Martín Vide, J.P. (2015) Desarrollo de un modelo morfodinámico para el proyecto de restauración del río Aragón en Navarra. *Actas II Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, 254-263, CIREF, Pamplona.

Palancar Panella, M. (1964). Encauzamiento, del Río Bernesga en León frente edificio de San Marcos. Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Obras Públicas.

Palancar Panella, M. (1968). Proyecto de canalización del río Bernesga y del río Torío a su paso por León. Ayuntamiento de León.

Peña Espeso, E. (2009). Proyecto de ejecución de las obras de acondicionamiento y mejora de las márgenes del río Bernesga en el T.M. de León. Confederación Hidrográfica del Duero.

Pérez Alfonso, A. (1971). Proyecto Reformado del de canalización del río Bernesga y del río Torío a su paso por León. Dirección General de Obras Públicas, Confederación Hidrográfica del Duero, Ministerio de Obras Públicas.

Pérez Alfonso, A. (1975). Proyecto de prolongación de la canalización del río Bernesga a su paso por la Ciudad de León.

Pérez Alfonso, A. (1977). Proyecto de canalización del río Bernesga desde la confluencia con el río Torío hasta el límite del Término Municipal de León. Confederación hidrográfica del Ebro, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas.

Pérez Alfonso, A. (1981). Modificación nº1 del Proyecto de canalización del río Bernesga desde la confluencia con el río Torío hasta el límite del Término Municipal de León. Confederación hidrográfica del Ebro, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas.

Pérez de los Cobos, P. (1908). Proyecto de reparación y mejora de la canalización del río Bernesga frente a León. División Hidráulica del Duero y Miño.

Sanchis, C., Segura, F., Almonacid, J. (2017) Channel forms recovery in an ephemeral river after gravel mining (Palancia River, Eastern Spain). *Catena*, 158: 357-370.

Santillán, J.I. (2015) El problema de la incisión en nuestros ríos. El ejemplo del río Bernesga aguas abajo de la ciudad de León. *Actas II Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restauraríos*, 237-244, CIREF, Pamplona.

Santillán, J.I. y Anta, R. (2013). Proyecto de demolición parcial del azud de San Marcos en el Río Bernesga (León). Dirección General de Agua, Confederación Hidrográfica del Ebro.

Segura, F. (2017) Canvis ambientals i antròpics recents en els sistemes fluvials mediterranis: crònica d'una destrucció anunciada. Discurs de recepció com a membre numerària de la Secció de Filosofia i Ciències Socials, Institut d'Estudis Catalans.

Segura, F., Sanchis, C. (2013) Assessment of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. The Rambla de Cervera, eastern Spain. *Geomorphology*, 201: 199-214.

Segura, F., Sanchis, C. (2018) Estrechamiento de cauces y cambio de patrón en cursos fluviales mediterráneos como consecuencia del cambio global en las últimas seis décadas: indicadores

geomorfológicos. En Garcia, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla, R.J. (Eds.) Geomorfología del “Antropoceno”: Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos. XV Reunión Nacional de Geomorfología, 395-398, Universitat de les Illes Balears, Mallorca.

Sistema Nacional de Cartografía de zonas Inundables. Estudios históricos, geomorfológicos, e hidráulicos para la identificación de Zonas Inundables, río Bernesga (2009). Confederación Hidrográfica del Duero, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Tomé Fernández, S. (1997) León, los ríos en el paisaje urbano. Universidad de Oviedo, Departamento de Geografía, 190 pp.

UPC (2005). Estudio hidráulico y morfodinámico del río Gállego en Zaragoza. Para el Ayuntamiento de Zaragoza, en colaboración la Universidad de Zaragoza.

Uribe Larrea, D., Pérez-González, A., Benito, G. (2003) Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (central Spain) over the past 500 years. *Quaternary Science Reviews*, 22: 2209-2221.

Vericat, D., Batalla, R.J. (2004) Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfología*, 18(1-2): 37-50.

L. Zhang, G. Parker, C.P. Stark, T. Inoue, E. Viparelli, X. Fu, and N. Izumi (2015). Macro-roughness model of bedrock–alluvial river morphodynamics, *Earth Surf. Dynam.*, 3, 113-138, 2015, <https://doi.org/10.5194/esurf-3-113-2015>

Zumárraga, R. (1907). Encauzamiento del río Bernesga en la confrontación de la Ciudad de León. Datos para la liquidación. Obras Públicas de la Provincia de León.

ANEJO A. FOTOINTERPRETACIÓN HISTÓRICA DEL RÍO BERNESGA

ANEJO B. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL RÍO BERNESGA

ANEJO C. CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO DE LA CUENCA. CORINE LAND COVER

ANEJO D. RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS

ANEJO E. FOTOGRAFÍAS DE LA EVOLUCIÓN RECIENTE DEL PUENTE DE ALIJA DE LA RIBERA

Las imágenes mostradas en este Anejo de 1992 y 2010 han sido obtenidas del Proyecto de Extracción de áridos en Exclusividad del río Bernesga, por parte de la empresa Peryflor (1992) y de la resolución de autorización de reparación del puente (2010) cedida por J.I Santillán (CHD).

ANEJO F. COORDENADAS DE LOS PERFILES LONGITUDINALES

ANEJO G. COORDENADAS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES