



GEOMORFOLOGÍA DEL DOMINIO FLUVIAL DEL DUERO EN EL SECTOR DE TORO (ZAMORA). EVOLUCIÓN RECIENTE DE LA LLANURA DE INUNDACIÓN

*Geomorphology of Duero River Domain in Toro sector (Zamora province).
Recent evolution of the Flood plain*

El dominio fluvial del Duero entre Castronuño-Toro

A. Sánchez del Corral Jiménez

Dpto. de Geografía, Universidad de Salamanca, C/Cervantes, 3 - E-37002
E-mail: jana@usal.es - Fax: 923 29 47 71

Resumen: El Dominio Fluvial del Duero presenta, en la zona de estudio, un valle disimétrico (escarpe al norte del río, un suave declive hacia el cauce al sur) y una llanura de inundación amplia e intensamente retrabajada por procesos fluviales y eólicos. Los grandes rasgos morfológicos, el trazado de parte del drenaje, especialmente los cambios de dirección del río en Castronuño y Toro, reflejan la distribución de los materiales paleógenos y neógenos del sustrato, así como la organización estructural de bloques infrayacentes. Se pueden distinguir dos etapas: en la primera, el paleo Duero describió inicialmente un desplazamiento hacia el norte generando unas terrazas escalonadas y no apareadas. En la segunda etapa se desarrolla la llanura de inundación en la que se diferencian: a) el tramo Castronuño-Toro con desplazamientos del canal hacia el SO y trazado de sinuosidad variable; b) tramo Toro-Peleagonzalo, con desplazamiento del canal hacia el norte y trazados rectilíneos. En esta etapa, hay evidencias de migraciones del canal y desbordamientos recurrentes inducidos por variaciones hidrodinámicas de los caudales.

Palabras clave: unidades geomorfológicas, llanura de inundación, paleocauces, terrazas fluviales, río Duero, España

Abstract: In the study area the Duero valley displays asymmetric configuration (escarpment to the North and a smooth declivity to the South) and an extensive flood plain that has been intensely reworked. The great morphologic characteristic, the pattern from some rivers, specially the changes of direction of the Duero River in Castronuño and Toro, reflected the distribution of Paleogene and Neogene sediments, as well as the structural arrangement of the underlying substrate. Two morphogenetic stages can be distinguished: a first one which the Duero described a displacement towards the North and deposited an asymmetric system of terraces. In the second stage the flood plain is developed in which the are a different: two stretches: a) Castronuño-Toro stretch, with channel displacement towards the Southwest and channels and palaeochannels of variable sinuosity; and b) Toro-Peleagonzalo stretch, with channel displacement towards the North and straight patterns. In the second stage there are some evidences of channel migrations and frequent flooding on account of flow variability.

Keywords: Geomorphological Units, flood plain, palaeochannels, fluvial terraces, Duero River, Spain



A. Sánchez del Corral Jiménez. Geomorfología del dominio fluvial del Duero en el sector de Toro (Zamora). Evolución reciente de la llanura de inundación. *Rev. C & G.*, 21 (1-2), 103-122.

1. Introducción

Un dominio fluvial, definido preferentemente por la acción directa del río, integra a importantes unidades morfológicas cuya morfogénesis y dinámica actual tienen diversos factores de control. Así mismo, el contexto geomorfológico del dominio fluvial, en sentido amplio, puede asumirse también como una de las claves para entender, por ejemplo, la evolución de la llanura de inundación, las modificaciones del trazado del cauce, incluso, la importancia y frecuencia de los desbordamientos (Schumm, 1993; Howard, 1996).

La llanura de inundación es un sistema complejo en el que se incluyen formas asociadas al canal, características del borde del mismo (depósitos laterales, diques) y características de la propia llanura de inundación, como antiguos canales y depósitos (Brown, 1996). Por otro lado, en ella convergen factores de relación difícil, como la variabilidad de los regímenes energéticos que son reflejo de los hidrológicos y sedimentológicos (Nanson y Croke, 1992). Éstos últimos, además, reflejan circunstancias ambientales invocadas tradicionalmente como factores de control de la terraza actual (geología, clima, vegetación, usos del suelo...).

Los objetivos concretos de este trabajo son: (1) Definir e interpretar las formas del relieve del Dominio Fluvial del Duero (DFD) en el tramo comprendido entre Castronuño y Toro con sus áreas adyacentes, que proporcionan información necesaria para ello. (2) Definir de manera objetiva la configuración de la llanura de inundación, mediante: a) el estudio de las migraciones del cauce, causadas por los frecuentes desbordamientos, que se manifiestan como paleocanales impresos en la misma, y b) la evaluación de la asimetría de la posición del canal sobre ella. (3) Establecer los posibles mecanismos de control de estas variaciones, relacionándolos con los eventos climáticos e hidrológicos extremos y con el marco geomorfológico del DFD. (4) Estos objetivos se resuelven, mediante la realización de una cartografía geomorfológica de la zona, cartografía que puede considerarse objetivo inicial (puesto que se enfoca para resolver unos fines concretos), y el resultado de las interpretaciones que se realizan.

Como antecedente directo, se realizó una aproximación a la geomorfología de esta zona, incluida

en un contexto más amplio (centro y oeste de Castilla y León) (Sánchez del Corral et al., 2.002). En este trabajo se amplia y profundiza la interpretación morfogenética mediante la metodología que se detalla más adelante.

2. El área de estudio: características ambientales y geológicas

El espacio geográfico al que se refiere este estudio está comprendido entre las coordenadas UTM: $X_{\min} 288654$, $Y_{\max} 4600677,381$, $X_{\max} 313065$, $Y_{\min} 4583717,433$, que forma parte de la zona centro occidental de la Cuenca Sedimentaria del Duero (Fig. 1).

La zona de estudio forma parte de la llanura castellana que se encuentra nivelada, al norte del Duero, en torno a los 740 metros, siendo interrumpida por el escarpe de este río, que alcanza hasta 100 metros de altura en Toro. Al sur del Duero, en la margen derecha, un suave modelado de topografía rugosa, desciende progresivamente hacia el cauce. Los sistemas de glacis que modelan las campiñas y los amplios valles con vertientes disimétricas, son los rasgos fisiográficos más evidentes y clásicamente definidos (Solé Sabarís, 1952; Plans, 1969 y Pérez González et al. 1994). Los materiales constituyentes corresponden al relleno cenozoico de la Cuenca del Duero, como sustrato, y a los depósitos de vertiente y aportaciones eólicas y fluviales posteriores.

El río Duero, con una longitud de 913 km, drena hacia el Atlántico una superficie de 98.375 km² que corresponde en su mayor parte a la Meseta Norte (altitud media en torno a 800 m). En ella, el tramo medio del río (de dirección general E-O), discurre en torno a 670 metros y alcanza 630 al abandonar la Cuenca Sedimentaria y entrar en el Zócalo Hercínico. En éste, cerca de la frontera portuguesa, realiza una fuerte incisión para llegar al océano.

El clima de la zona presenta rasgos continentales dentro del contexto climático mediterráneo propio de su posición latitudinal. Las temperaturas, según García Fernández (1986) se caracterizan por una acusada amplitud anual ($\pm 19^{\circ}$ C), un verano breve y suave, y un periodo frío largo (6 meses con una temperatura media de 3,5 a 4° C). El verano,

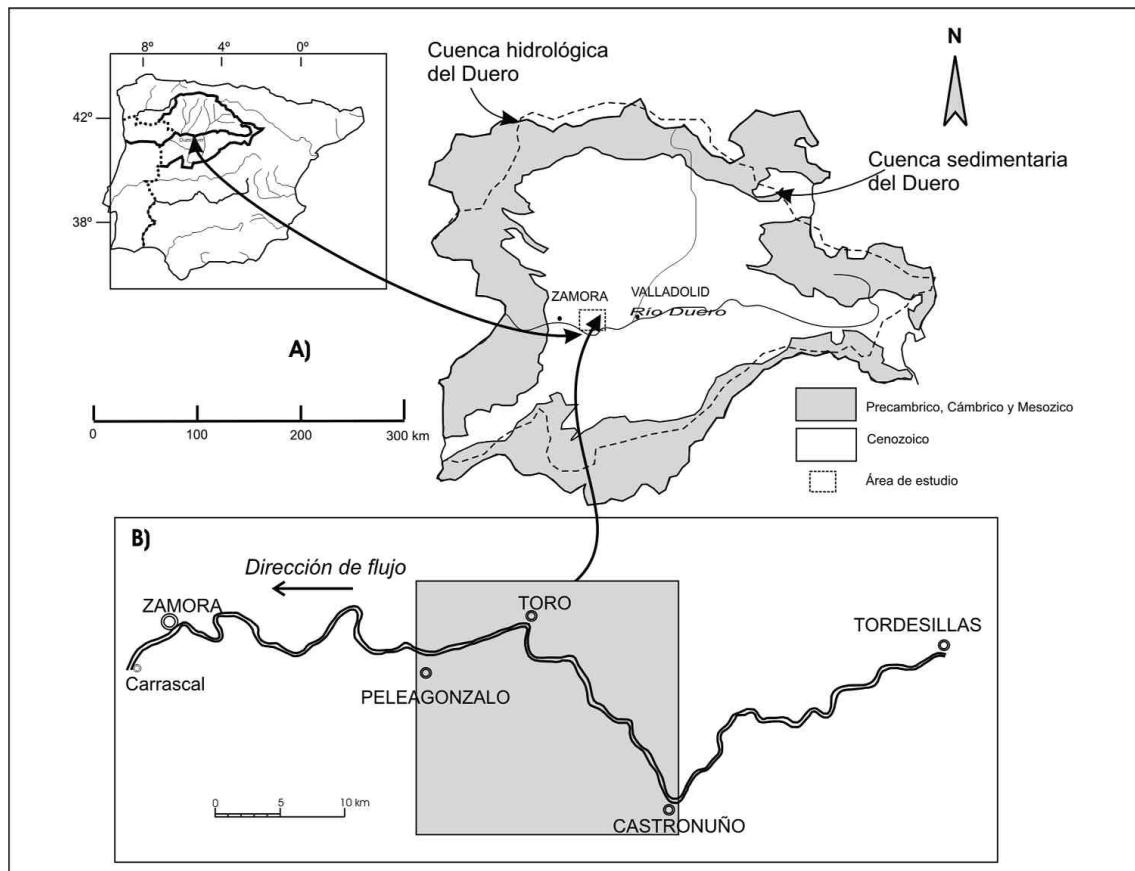


Figura 1. A) Localización del área de estudio. B) Trazado del río Duero entre Tordesillas y Zamora.
Figure 1. A) Location of the study zone B) Pattern und stretches of Duero river between Tordesillas and Zamora.

cálido y breve, tiene una temperatura media de 21 a 23° C. Las precipitaciones son escasas (408 mm anuales en Toro), y se producen preferentemente en invierno. La notable aridez estival determina un balance hídrico negativo (-355,8 mm en Zamora).

La vegetación está muy condicionada por el clima que favorece la presencia de especies xerófilas como la encina: *Quercus ilex* subespecie *Ballota*, que se adapta a los ambientes de interior y el pino piñonero (*Pinus pinea*), (Costa Tenorio et al., 2001). Las roturaciones de montes y abandonos de tierras, favorecen la presencia de un monte bajo y matorrales ralos que dejan los suelos muy desprotegidos frente a la erosión.

El caudal medio del Duero en Toro es de 390 m³/s y cerca de la desembocadura de 675 m³/s. Los máximos caudales se registran en los meses de

invierno y en el verano se produce un notable descenso que inicia su recuperación en otoño. La irregularidad interanual es elevada como denotan, para la estación de Toro, aportaciones máximas mensuales de 2.056 hm³ en febrero de 1958, cuando la media de este mes es de 514 hm³, y aportaciones mínimas de 2 hm³ en agosto de 1978, cuando la aportación media es de 66 hm³. Las avenidas son frecuentes, con rápidas e importantes crecidas del caudal (Máximos Instantáneos de 1.810 m³/sg en Toro o de 3.071 en Carrascal, aguas debajo de Zamora, Fig. 1, B). Datos puntuales disponibles (Comisaría de aguas del Duero, estaciones de aforos de Toro y Carrascal) de años anteriores confirman el irregular comportamiento interanual del río.

Desde el punto de vista geológico, la zona se integra en el sector occidental de la Cuenca

Sedimentaria del Duero (Fig. 1, A), donde los estudios sedimentológicos y estratigráficos son relativamente abundantes. Recientemente Delgado y Alonso-Gavilán (2003), establecen para el Terciario de la Cuenca del Duero entre Zamora y Tordesillas, tres grandes ciclos sedimentarios: (1) Cretácico Superior-Paleógeno, (2) Eoceno superior-Oligoceno y (3) Neógeno. En el área de este trabajo se encuentran representados los materiales desde el Eoceno Medio-Superior al Mioceno Inferior.

En la margen derecha del Duero, el Paleógeno aflora sólo en el escarpe de Toro, aproximadamente entre 640 y 690 metros. Jiménez Fuentes y García Marcos (1981), llaman al conjunto Series de Geroma y Toro. En él diferencian, por un lado, los limos arenosos que afloran en la base del escarpe junto al puente romano (645 m); por otro, y como un cambio lateral de facies, las areniscas masivas con intercalaciones de limos, arenas y conglomerados –las Series de Toro- que constituyen la mayor parte del escarpe. Equivalen a las series de Geroma de Corrochano (1982) y a la Unidad de Geroma de Delgado y Alonso-Gavilán (2003). Este conjunto paleógeno, desarrolla un paleorrelieve algo inclinado hacia el norte y el este, posiblemente a causa del paroxismo sávico, que es aceptado por los autores citados. La edad, se ha estimado que está comprendida entre Eoceno Medio y Oligoceno.

Al sur del Duero (margen izquierda), la base del modelado son, siguiendo a Jiménez Fuentes y García Marcos (1981), las areniscas, conglomerados y limos, organizados en bancos delgados, que constituyen el Grupo Inferior Paleógeno y las Areniscas de Toro, equivalentes a las series descritas en el párrafo anterior. Sobre ellas se define el Grupo Superior Paleógeno, muy similar al anterior pero con bancos más amplios. Ambos grupos están claramente inclinados al este o el noreste, según sectores y parece clara la influencia de la tectónica de bloques del sustrato infrayacente. El Paleógeno culmina, al sur del Duero, con las Series de Valdefinjas formadas por unos niveles de areniscas compactas que soportan las calizas detriticas y areniscas calcáreas (calizas de Valdefinjas). Constituyen las zonas altas de este estudio, situadas en torno a los 800 m (Fig. 2).

Sobre el Paleógeno y en clara discordancia, se deposita el Neógeno. En efecto, al norte del Duero

los sedimentos del Mioceno Inferior fosilizan el paleorrelieve que afecta al Paleógeno. En consecuencia, el contacto Paleógeno-Mioceno ha sido observado a diferente altura hacia el norte y el este (Jiménez Fuentes y García Marcos, 1981). Litológicamente, los sedimentos miocenos están formados por un conglomerado cuarcítico de matriz arcillo-arenosa e intercalaciones de areniscas y limos. Son citados como Facies Roja de Toro por Jiménez Fuentes y García Marcos (1981) y equivaldrían a la Facies Mirazamora de Corrochano (1977) y a las Series Rojas de Martín Serrano (1988).

El Mioceno al sur del Duero, en el área que cubre este trabajo, no está representado, aunque inmediatamente al este del meridiano de Castronuño aparecen las series del Mioceno Inferior y Medio.

El Cuaternario está constituido por terrazas fluviales, depósitos eólicos, conos de deyección y coluviones, junto con la llanura de inundación y depósitos de canal. Ha sido estudiado, además de por los autores que se vienen citando (Jiménez Fuentes y García Marcos, 1981), por Pérez González et al. (1994) y Pérez González (1982) que realiza el mapa geomorfológico del sector Tordesillas-Medina del Campo. En él, se representa parte de las terrazas situadas al oeste de Castronuño.

Las terrazas repiten la asimetría transversal del valle. Así, en la margen izquierda se han cartografiado 11 niveles (Jiménez Fuentes y García Marcos, 1981), el más alto situado a +130 metros, mientras que en la margen derecha los niveles más altos –sobre el escarpe de Toro- se sitúan entre +100 y +80 metros. Hay que puntualizar que las terrazas T1 a T4, (margen izquierda) quedan fuera de la zona representada en el mapa que se incluye en este artículo. La cartografía realizada difiere algo de la efectuada por los autores anteriores en cuanto a la extensión y forma cartográfica de las terrazas, sobre todo de las medias en la margen izquierda. Las terrazas medias, están representadas por cuatro niveles: T5 (+100-90 metros), T6 (+70-65 metros), T7 (+40-30 metros) y T8 (+25 metros). Las terrazas bajas: T9 (+25 metros), T10 (+10 metros) y T11 (+5 metros), tienen límites bastante claros y presentan recubrimiento eólico.

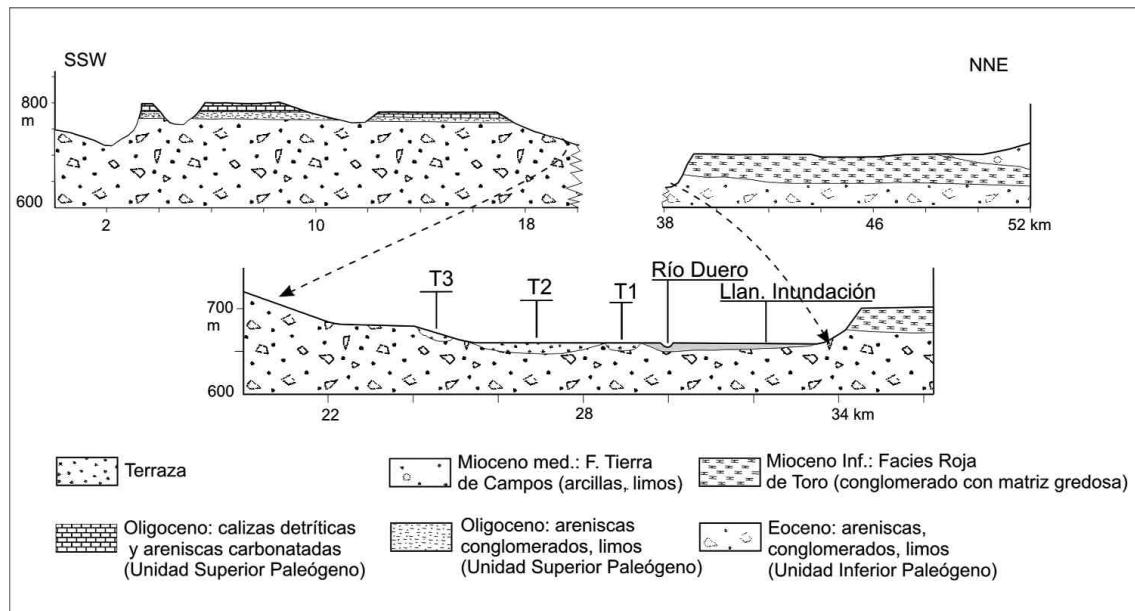


Figura 2. Corte transversal del Dominio Fluvial del Duero desde los niveles paleógenos al sur del río hasta los miocenos de Toro. Nótese la asimetría topográfica, geológica y de la posición del canal en la llanura de inundación.

Figure 2. Cross section covering the surfaces from the Paleogene to the Miocene. Note the asymmetry of the river domain and the position of the channel on the flood plain.

Los demás depósitos cuaternarios, por su estrecha vinculación con la morfogénesis reciente (sobre todo la llanura de inundación) y para evitar reiteraciones, se tratarán en el apartado 4.

3. Metodología

3.1. Cartografía y modelos digitales

La cartografía geomorfológica, el análisis morfotopográfico realizado a partir de modelos derivados de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), junto con la fotografía aérea y el trabajo de campo, han sido, las herramientas básicas para la discriminación de formas, unidades de relieve, elementos y atributos en la zona de estudio. La escala de trabajo ha sido 1:25.000, por lo que el mapa el geomorfológico ha sido readaptado y simplificado para su reducción a la escala que se presenta en este artículo.

Para establecer las unidades geomorfológicas, localizar y definir procesos se han empleado foto-

grafías aéreas a escala 1:30.000 y trabajos de campo. El foto-mapa obtenido se ha escaneado, georreferenciado y rectificado (registro de la imagen con 10 puntos, programa “Register” de “Arc-Info”, “Worstation 7.2.1”), para pasar a ser visualizado y manipulado en Arc-View 3.2. La base topográfica y planimétrica digital empleada ha sido la “BCN 25” del IGN.

El MDE y los modelos derivados se han realizado empleando de manera combinada Arc-View 3.2 – Spatial Analyst y Surfer. Entre ellos, el de pendientes y el de orientaciones han resultado muy útiles como herramienta de trabajo para la interpretación morfotopográfica: definición de superficies, de la llanura de inundación, terrazas o la orientación de vertientes.

3.2. La llanura de inundación: trazado del río y migraciones del canal

Las propiedades de la llanura de inundación – marco de referencia del trazado actual del río y de

las migraciones del canal- se han obtenido, fundamentalmente, a partir de fotografías aéreas y del mapa geomorfológico. Sobre las primeras se han delineado los límites de la propia llanura, paleocanales, trazado de afluentes, etc. El mapa de la llanura de inundación (derivado del mapa geomorfológico) se ha complementado para su representación con uno de los modelos ("Shaded Relief Map") que apoyan la interpretación de asimetrías, orientaciones de vertientes y surcos en la llanura de inundación así como sus límites cartográficos (estrechamente ligados a las pendientes del terreno).

Para valorar adecuadamente el trazado del Duero en el tramo que se estudia, se ha aplicado el índice de sinuosidad (Longitud del río/ Distancia entre el principio y final del valle, Schumm, 1963) a un recorrido del río mayor -entre Tordesillas y Zamora- pues en él el río realiza dos grandes cambios de dirección que son importantes para la comprensión del contexto morfoestructural (Fig. 1, B).

En el estudio de las propiedades planimétricas del trazado y cambio del canal se ha evaluado, (a) la posición el canal y (b) las direcciones de su desplazamiento (migración). Para ello se ha ideado una medida de la asimetría (similar a la utilizada por Cox et al, 2001) para calcular la simetría del valle) que se aplica a transversales perpendiculares al eje de simetría de la llanura de inundación y en el marco de referencia de ésta. El cálculo se realiza en los siguientes términos:

$$I.A. = Dc/dm$$

Donde I.A. = índice de asimetría; Dc = distancia del eje axial de la llanura de inundación al canal actual y Dm = distancia del borde de la llanura de inundación al eje axial de la misma.

El valor 0 representa la simetría perfecta y valores sucesivamente mayores expresan mayor asimetría. La dirección del desplazamiento del canal se ha medido teniendo en cuenta la posición de los Paleocanales cartografiados. Los resultados de la aplicación de este índice muestran una tendencia que es apreciable también "de visu"; su interés radica entonces en su aplicación a un gran número de tramos y de ríos de manera que los resultados representados gráficamente faciliten la comparación y explicación. El índice de asimetría (I.A.) se ha aplicado a 23 transversales (Tr1 a Tr23) emplazadas en los puntos de inflexión de las curvas del

canal y en ellos se ha medido también la dirección de los desplazamientos.

Para el seguimiento e interpretación de la dinámica fluvial reciente se ha seguido también un método histórico basado en noticias sobre inundaciones, catástrofes, y sobre las reconstrucciones que sufre el puente antiguo de Toro a causa de las avenidas. Igualmente, proporciona, información complementaria sobre estos aspectos la cartografía histórica, concretamente los mapas de Tomás López (1784) y el de Coello (1863).

4. El modelado del Dominio Fluvial del Duero: Unidades Geomorfológicas

Los amplios interfluvios y fondos de valle característicos de la llanura castellana se rompen en las proximidades del gran colector, el Duero, dando paso a una mayor variedad morfológica y de procesos (fluviales, de vertiente, eólicos). El análisis geomorfológico detallado establece una serie de unidades, en las que la morfogénesis relacionada con la red fluvial actual es importante (Pérez González et al. 1994), pero hay que destacar la influencia de los relieves anteriores a la red fluvial actual (que presentaban, como ahora, mayor altura al sur del actual Duero, condicionando la dirección de la escorrentía superficial), así como la trascendencia morfodinámica de la disposición de los bloques que soportan los sedimentos cenozoicos.

En este sentido, se observa que los afluentes del Duero por la margen izquierda, entre el regato de Valdelapega y el arroyo del Caño, siguen un trazado rectilíneo (SO-NE) y paralelo entre sí. Entre estos dos cursos de agua parece definirse un bloque (bloque Valdelapega-El Caño) que controlaría los cambios de dirección del río en Castronuño y Toro y que regula los dos tramos fluviales: Castronuño-Toro de dirección SE-NO y Toro-Peleagonzalo de dirección Este-Oeste (Fig. 3).

Las unidades geomorfológicas representadas en la cartografía son: las "superficies", que se han establecido según un criterio topográfico y, en su caso, por la existencia de niveles de terrazas asociadas; las "vertientes", con diferentes grados de inclinación y orientación; las unidades de origen fluvial son fundamentalmente las "terrazas", "conos aluviales" y las "barras" asociadas directa-

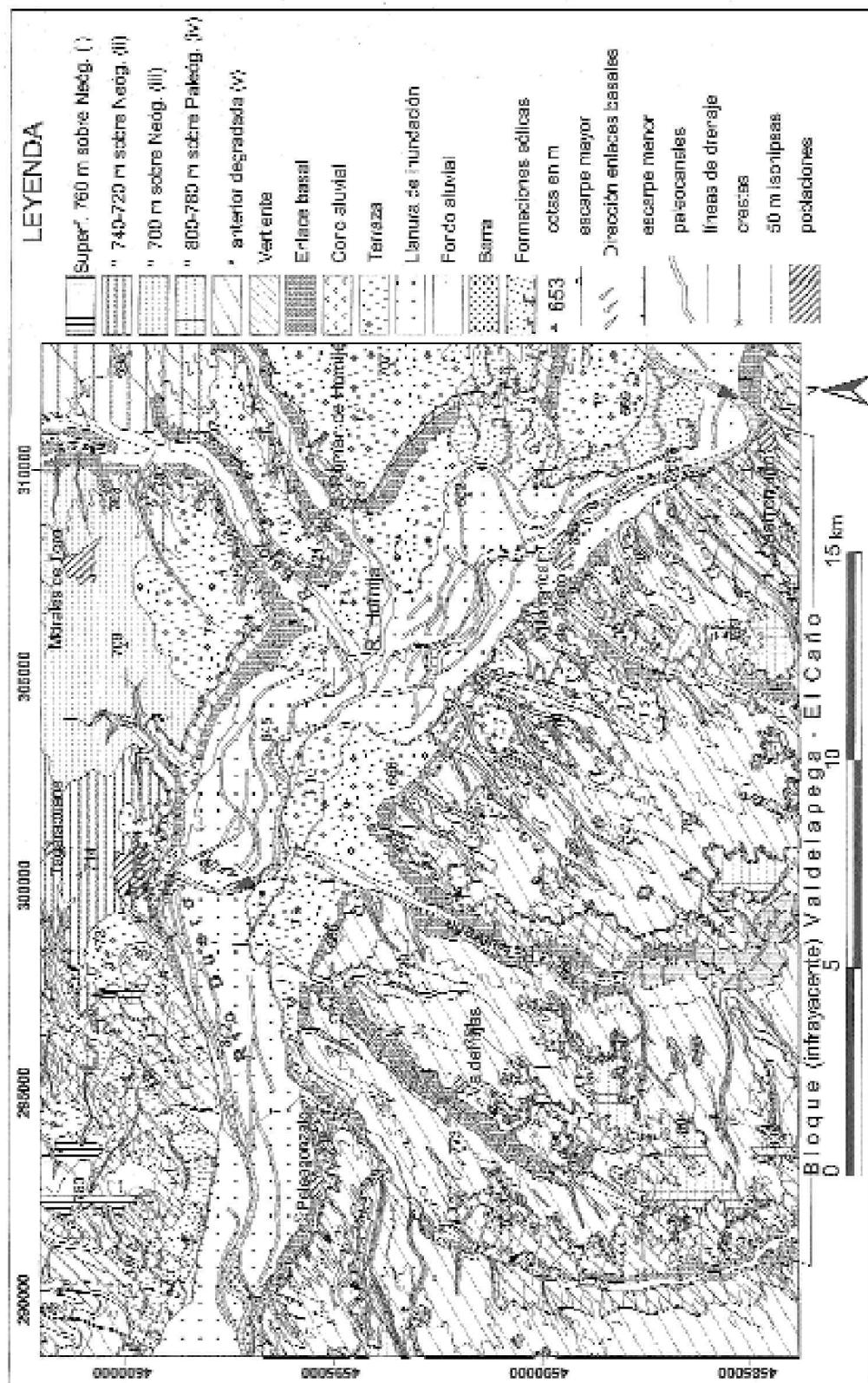


Figura 3. Mapa geomorfológico del Dominio Fluvial del Duero entre Castronuño y Peleagónzalo
Figure 3. Geomorphological map of the River Duero Domain between Castronuño and Peleagónzalo.

mente al cauce; están también representados depósitos “eólicos” sobre terrazas y fondos aluviales. La llanura de inundación se analiza en el apartado siguiente.

4.1. Superficies y terrazas fluviales

Se tratan en este apartado conjuntamente superficies y terrazas por la estrecha relación que presentan muchas veces para la interpretación.

a) Al norte del Duero, las diferentes superficies se desarrollan sobre sustrato mioceno con suave pendiente hacia el sur (2,5 %), hasta el borde del gran escarpe del Duero. Se definieron tres niveles como parte del nivel general que se inicia en la base de las cuestas y los cerros residuales del Páramo (Sánchez del Corral et al. 2002).

Estas superficies, y su interpretación, son las siguientes: (i) La más elevada, “Superficie 760 m sobre Neógeno”, está algo inclinada hacia el norte a causa de glaciplanaciones locales y tiene carácter residual. Se conserva en Monte la Reina y Carrascal (Figs. 3 y 4, A). Podría ser interpretada como una superficie anterior a la red fluvial actual, ligada a la fase endorreica de la Cuenca del Duero, la etapa de sedimentogénesis de Martín-Serrano (1988). (ii) La “Superficie 740-720 m sobre Neógeno” se encaja en la anterior. En ella se localizan varios retazos de la terraza T5 (+100-90 m), fuertemente incida por el arroyo Adalía. Su composición es diferente (conglomerado limo-arcilloso rojo) a la del mismo nivel en la margen izquierda (cantos grandes y bloques con matriz rojiza). (iii) La “Superficie a 700 m sobre Neógeno”, al NE y E de Toro, se elabora sobre el Mioceno Inferior. Está muy bien nivelada, apenas tiene marcado el drenaje superficial y es la base de la terraza T6, disectada por el sistema Bajoz-Hornija. La base de la vertiente asociada a la superficie 700 m, da paso a la terraza baja (T9), bastante amplia y que en la zona interna del meandro de Castronuño está parcialmente recubierta por arenas eólicas. Estos dos últimos niveles de superficies (fossilizados localmente por terrazas), se relacionan con la etapa morfogénética que se inicia con la organización del drenaje atlántico. Sería posterior a la que generó la “Superficie 760 m sobre Neógeno” (Figs. 3 y 4 B).

Todas estas superficies se van reduciendo en extensión a causa del retroceso de las vertientes

asociadas al propio Duero y a los afluentes Adalía, Bajoz y Hornija, proceso, por tanto, controlado por el nivel de base local.

b) Al sur del Duero aparecen: (iv) la “Superficie 800-780 m sobre Paleógeno”, desarrollada sobre las calizas detríticas y areniscas calcáreas (“calizas de Valdefinjas”), es la única bien conservada en retazos residuales de extensión variable y límites precisos y (v) la “Superficie sobre Paleógeno degradada”, elaborada a partir de la anterior por la escorrentía superficial. Este proceso ocasiona una topografía más irregular y deja expuestos los materiales del Paleógeno Inferior en los que adquiere mayor extensión. Sobre ella se localizan, fosilizándola, las terrazas medias, comprendidas entre los niveles +100-90 metros (T5) y +25 metros (T8) y las bajas, de T9 (+25 metros) a T11 (+5 metros), cuyas gravas y arenas son objeto de una intensísima explotación en la zona de Toro.

La diferencia de altura entre las superficies a ambos lados del río, esto es, entre la “Superficie 800-780 m sobre Paleógeno” (iv) y la “Superficie 760 m sobre Mioceno” (i), no parece relacionarse

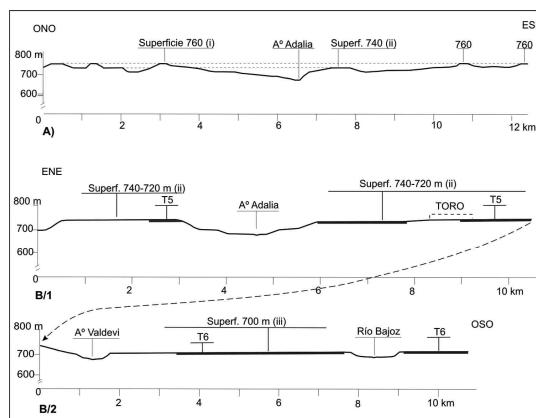


Figura 4. Perfiles al N del Duero: A) Restitución de los niveles de las superficies a 760 m (i) y 740 m (ii) en torno al arroyo Adalía. B/1) Relación entre la “Superficie 740-720 m sobre Neógeno” (ii) y la terraza T5. B/2) Relación entre la “Superficie 700 m sobre Neógeno” (iii) y la terraza T6.

Figura 4. Profiles to the north of Duero river: A) Restitution of the 760 m (i) and 740 m (ii) Surfaces around Adalía stream. B/1) Relation between the “740-720 m Surface on Neogene” (ii) and the T5 Terrace. B/2) Relation between the “700 m Surface on Neogene” (iii) and the T6 Terrace.

con una fractura que controlara el escarpe de Toro. Esto se infiere a partir de las observaciones de Jiménez Fuentes y García Marcos (1981) que indican que el Mioceno Inferior en el escarpe de Toro se sitúa sobre a 690 m, mientras que el Oligoceno (Series de Valdefinjas) lo hace sobre los 780. Señalan, también, que aparentemente la zona no está tectonizada y vinculan la diferencia de cota, al recubrimiento del paleorrelieve paleógeno (cuya cota disminuye hacia el N y el E) por los sedimentos miocenos. De esta manera, se puede mantener la datación oligocena, bastante probable, para las series de Valdefinjas ya que de otra manera, estas tendrían que ser miocenas. Esta idea traslada a la evolución geomorfológica de la zona, permite establecer la siguiente hipótesis: (1) una vez recubierto el paleorrelieve paleógeno por los sedimentos miocenos, la topografía quedaría más o menos igualada, a ambos lados del actual Duero, a una cota similar a la que actualmente presenta el Mioceno Inferior al norte del río (765 m) y destacando sobre ella los niveles superiores del Paleógeno (Fig. 5, A). (2) La zona del contacto entre el Paleógeno y el

Mioceno, menos resistente (por la escasa coherencia de los conglomerados neógenos y la menor resistencia a la erosión fluvial típica de los contactos entre diferentes litologías) es la que, posiblemente, explota el paleo Duero en este sector. El río se desplazaría hacia el norte, hacia la posición actual (Fig. 5, B) bajo el control de la inclinación de los bloques del zócalo infrayacente.

4.2. Vertientes y conos aluviales

El trabajo de la red tributaria del Duero ha dado lugar a valles de vertientes pronunciadas y, en ocasiones, a barrancos asociados a líneas de drenaje intermitente, pero de gran potencial erosivo gracias al desnivel que han de salvar para alcanzar su nivel de base local. Estas vertientes articulan las superficies y las unidades fluviales y adquieren diversas inclinaciones: (1) "Escarpes", correspondientes al segmento superior asociado a las litologías más resistentes, como ocurre en los bordes de la Superficie sobre Paleógeno (calizas de Valdefinjas); en otros casos, suelen coincidir con bancos más resistentes de la serie paleógena o miocena (2) "Laderas", tienen menor inclinación que los anteriores, corresponden a materiales relativamente deleznables o poco coherentes, pero se desarrollan indistintamente al norte y al sur del Duero asociados tanto a los materiales paleógenos como a los neógenos. Por ello, más que la litología, el factor dominante en su génesis es la posición respecto al Duero. Tienen con frecuencia recubrimiento coluvionar (material arenoso-arcilloso) y perfil ligeramente cóncavo o rectilíneo. (3) En los valles tributarios mayores y en el principal, se desarrollan unos "Enlaces basales", o banda de acumulación detrítica que festonea la base de las vertientes a modo de glacis de recubrimiento y que da paso a las unidades fluviales (Fig. 3). Están constituidos por sedimentos finos, arcillas y arenas liberadas de los escarpes superiores y transportados por el viento y/o agua.

Las vertientes de los valles afluentes por la margen izquierda (dirección general SO-NE) han desarrollado -como el valle principal- una acusada disimetría transversal, que se traduce en una vertiente oriental más inclinada. Es el caso del regato Valdelapega y el río Guareña que drenan el "bloque

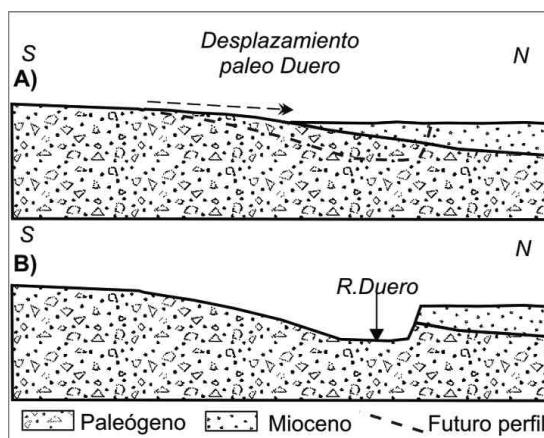


Figura 5. Modelo de la génesis del valle del Duero en la zona de estudio a partir de la migración del paleo

Duero y erosión de la zona de contacto entre el Paleógeno y el Mioceno. A) Hipotético perfil inicial y contacto Paleógeno-Neógeno. B) Perfil actual como resultado preferente de la erosión fluvial.

Figure 5. Model of origin of Duero valley in the study zone from river migration and erosion of the contact zone between Paleogene and Neogene. A) Hypothetical initial profile and Paleogene-Neogene contact. B) Present profile as a preferential result of fluvial erosion.

Valdelapega-El Caño". La causa debe estar, como en el valle principal, en el control de los bloques del zócalo.

Sobre "escarpes" y "laderas" se localizan procesos activos gravitacionales, preferentemente en los primeros y arroyadas, con diferente grado de evolución, en las segundas. Se trata de procesos bastante rápidos que en algunos lugares (por ejemplo en el escarpe de Toro) son causa de problemas importantes a los que se han aplicado medidas correctoras de eficacia controvertida. En cualquier caso, estos procesos generan abundantes aportes laterales al cauce.

Los "conos aluviales", son de pequeña extensión, por lo que algunos no se encuentran representados en el mapa que se presenta en este trabajo. Articulan topográficamente las vertientes y la llanura de inundación o fondos aluviales, como una expresión del cambio energético que se produce entre estas unidades

4.3. Formaciones eólicas

Las formaciones eólicas (mantos eólicos y dunas) se localizan en algunos enlaces basales y fondos aluviales (en el arroyo Adalía), además de sobre la terraza T9, en el meandro de Castronuño. Aquí se trata de un recubrimiento que nunca supera los 2-3 metros de espesor y que es funcional desde el Pleistoceno Medio (Pérez González, 1982). En la actualidad los procesos eólicos, con menor intensidad, sigue actuando. Su influencia sobre la morfogénesis de la llanura de inundación aún no ha sido suficientemente estudiada, por ejemplo, existe una interfase eólico-fluvial en la llanura de inundación, compleja, debido a la interferencia de dos sistemas morfogenéticos como se explica a continuación. De hecho, los procesos eólicos, junto con los movimientos en masa, no son considerados en la clasificación de llanuras de inundación, y revisión de clasificaciones anteriores, que realizan Nanson y Croke (1992).

Por interfase eólico-fluvial se entiende aquí, por un lado, el espacio que registra procesos fluviales y eólicos, su morfología se construye por la convergencia espacio-temporal de estos dos sistemas morfogenéticos. Por otro lado, y derivado de lo anterior, este concepto define también a este sistema morfogenético mixto. Según esto, en un con-

junto de terrazas-llanura de inundación dado, la interfase eólico-fluvial se manifiesta en la llanura de inundación (o T0 = terraza activa) y en los fondos aluviales activos que registrarán actividad eólica. Y no se manifestaría sobre los otros niveles de terrazas, aunque también estuvieran afectados por la actividad eólica (los depósitos eólicos fosilizarían la terraza).

5. La llanura de inundación y dinámica del río Duero

La unidad geomorfológica más compleja y trascendente para la interpretación de la última gran etapa morfogenética del DFD es, sin duda, la llanura de inundación o terraza actual (T0). En ella se desarrolla una gran variedad de formas, bien descritas en la literatura, relacionadas con la dinámica fluvial (Allen, 1965), que permite evaluar la historia reciente del río. Es, además, el ámbito en el que se establecen atributos a gran escala (O'Connor et al. 2003), como la sinuosidad del canal o su posición respecto al eje de simetría de la llanura.

En la zona de estudio, la llanura de inundación, presenta un desarrollo considerable, con una extensión máxima de 3.571 m en el meandro de Castronuño y mínima, de 1.437 m a la altura de la desembocadura del Bajoz. Constituye la fértil Vega de Toro explotada agrícolamente desde la temprana ocupación de la zona por el hombre. Conserva un importante registro de antiguos canales, testimonio geomorfológico de las migraciones del canal, estructuras erosivas y formas de depósito, (Fig. 6).

Se pueden distinguir dos sectores en llanura de inundación asociados a los dos grandes tramos del río controlados por el bloque Valdelapega- El Caño. Éstos presentan un trazado y dirección de migración del canal diferente. El primer sector, Castronuño-Toro (dirección SE-NO), está comprendido entre las transversales Tr1 y Tr15 y el segundo, Toro-Peleagonzalo (dirección E-O), entre la última y el borde oeste del mapa. (Fig. 6).

5.1. El trazado del Duero

Del análisis del trazado del río se obtiene que el índice de sinuosidad (I.S.) aplicado al tramo

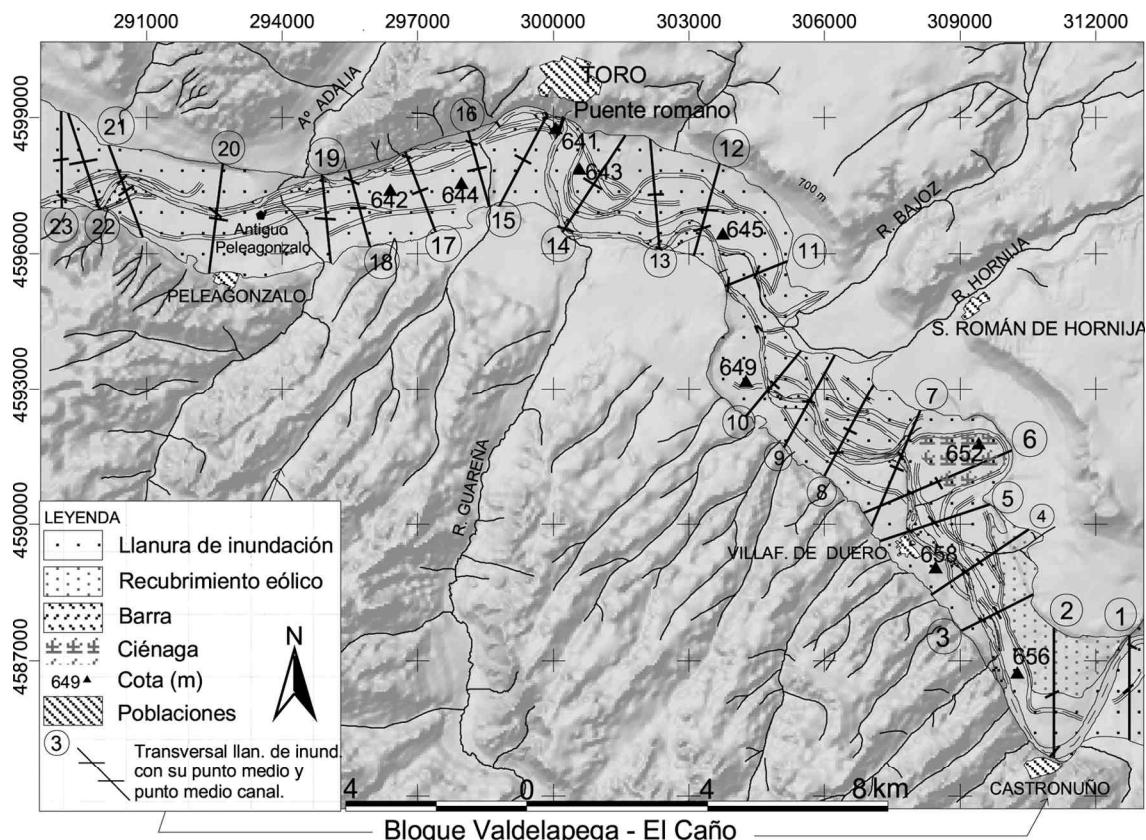


Figura 6. Mapa de configuración de la llanura de inundación en la zona de estudio, representando las transversales establecidas para el cálculo del índice de asimetría. La base es un “Shaded Relief Map” que resalta la conformación topográfica de la zona.

Figure 6. Map of the configuration of the flood plain in the study zone, representing the cross-sections established for the calculation of the Asymmetry Index. The basis is a “Shaded Relief Map”.

Tordesillas-Zamora (Tm_6) es de 1,41, es decir, sería un río de tipo regular (Schumm, 1963) o sinuoso (Morisawa, 1985). Se trata de un valor enmascarado por los dos grandes cambios de dirección de tipo estructural que realiza el río, como ocurre también en los tramos Tordesillas-Toro y Castronuño-Zamora (Tm_5 y Tm_4). Por eso se calculó el I.S. también en los tramos definidos por los cambios de dirección estructural (Tm_1 , Tm_2 y Tm_3) afín de conocer la sinuosidad hidráulica (Longitud del río/longitud del valle, Mueller, 1968), y todos arrojaron valores bastante bajos (Fig. 7).

En los tramos objeto de este estudio, Castronuño-Toro (Tm_2) y Toro-Peleagonzalo (la parte más rectilínea de Tm_3), los I.S. -de 1,10 para

el primero y 1,04 para el segundo- indican un trazo sinuoso bajo y rectilíneo, respectivamente (Morisawa, 1985), (Fig. 7).

El índice de asimetría (I.A.), por su parte, se aplicó a las 23 transversales (Tr1 a Tr23) representadas en la figura 6; sus valores y la dirección de los desplazamientos de las curvas del río, se pueden ver en la tabla 1.

Los valores del I.A. pueden agruparse en una escala de valores como la que se representa en la figura 8. Obsérvese que las transversales totalmente asimétricas suelen coincidir con los grandes cambios de dirección del río y que son muy frecuentes asimetrías elevadas (I.A. > 0,5-0,6) a partir de la transversal 15.

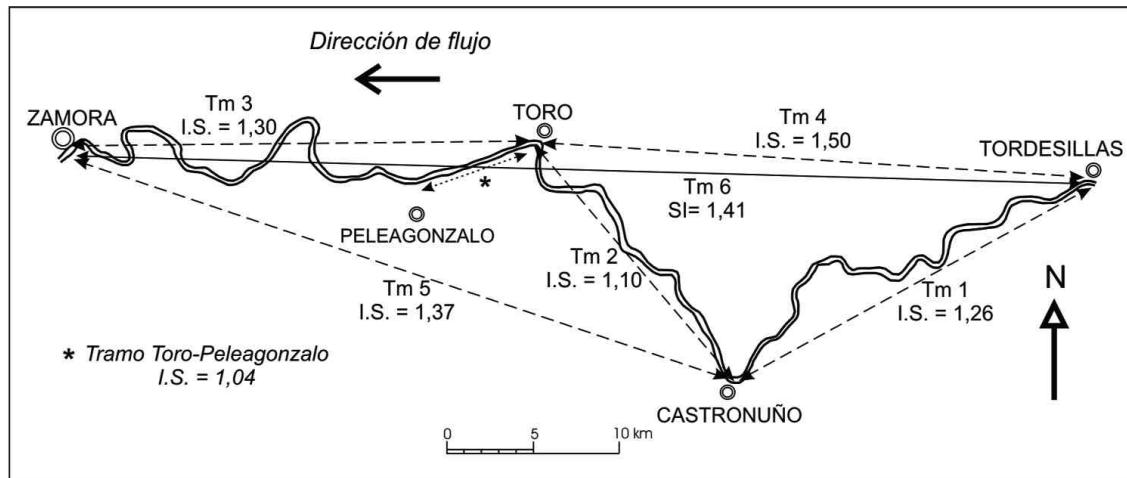


Figura 7. Índices de sinuosidad del Duero, aplicados entre Tordesillas y Zamora a diferentes tramos (Tm1 a Tm6). En él se observa el contexto de los tramos Castronuño-Toro (Tm2) y Toro-Peleagonzalo (que es parte de tramo Tm3 = Toro-Zamora).

Figure 7. Duero Sinuosity Index applied to different stretch (Tm1 to Tm6) between Tordesillas and Zamora. Note the context of Castronuño-Toro (Tm2) and Toro-Peleagonzalo (included in Tm3 = Toro-Zamora) stretches.

Si se calcula el I.A. medio por sectores (media de las transversales del tramo considerado) y se compara con el I.S. de la pendiente del tramo correspondiente, se aprecia que a menor pendiente, más asimetría y menor sinuosidad. Es el caso del tramo Toro Peleagonzalo (Tabla 2).

La interpretación detallada de estos resultados se realiza en el apartado siguiente.

5.2. Los desplazamientos del canal en el sector Castronuño-Toro

Entre Castronuño y Toro, los paleocanales muestran un trazado más meandriforme que el Duero actual. Se observan cambios de emplazamiento, mediante “pulsaciones” y “acortamientos o avulsiones”, que dan lugar a variaciones de la lon-

Tabla 1. Índices de asimetría (I.A.) y direcciones de desplazamiento para cada transversal.
Table 1. Asymmetry index (I.A.) values and directions of displacement for each cross-section.

Transversales	I.A.	Dirección (°)	Transversales	I.A.	Dirección (°)
1	1.00	0	13	1.00	175
2	1.00	180	14	1.00	207
3	0.41	235	15	0.94	20
4	0.29	237	16	0.67	350
5	0.45	250	17	0.85	345
6	0.36	230	18	0.71	350
7	0.22	16	19	0.91	355
8	0.49	195	20	0.09	188
9	0.01	26	21	0.23	350
10	0.19	210	22	1.00	167
11	0.90	237	23	0.77	0
12	0.40	193			

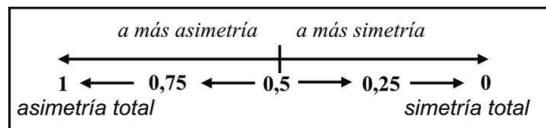


Figura 8. Distribución cualitativa de los valores del Índice de Asimetría (I.A.), entre simetría total (I.A.= 0) y asimetría total (I.A. = 1).

Figura 8. Qualitative distribution of Asymmetry Index values change between total symmetry (I.A.= 0) and total asymmetry (I.A. = 1).

Tabla 2. Índices de Sinuosidad (I.S.), de Asimetría medio (I.A. medio), pendiente del río (P) en los tramos: Castronuño-Peleagonzalo (C-P), Castronuño-Toro (C-T) y Toro-Peleagonzalo (T-P).

Table 2. Sinuosity Index (I.S.), mean Asymmetry Index (I.A. medio), river gradient (P) in: Castronuño-Peleagonzalo (C-P), Castronuño-Toro (C-T) y Toro-Peleagonzalo (T-P) stretches.

	I.A. medio	I.S.	P %oo
C-P	0,60	1,33	0,46
C-T	0,58	1,10	1,46
T-P	0,65	1,04	0,41

gitud del canal. Se emplea, aquí, el término “pulsación” en el sentido de movimiento reiterado del cauce que supone un cambio, más o menos brusco, de su posición en la llanura de inundación. Las pulsaciones suelen implicar un “incremento o expansión” del canal, con aumento de su longitud. Tiene en un significado similar al de “avulsión” (Allen, 1965 y Jones y Harper, 1998), pero aquí se ha preferido reservar el término “avulsión” (que equivale a extirpación o escisión) para cuando no hay modificación de la longitud del tramo que muta su posición o hay acortamiento de un meandro.

Estos hechos –variaciones de longitud- tienen sus correspondientes repercusiones en la dinámica fluvial asociada a variaciones de la pendiente. Esta es una idea que puede derivarse de lo argumentado por Leopold y Bull (1979), acerca de que el trazado del canal puede ajustarse para absorber el efecto de un cambio en el nivel de base. Pero también, los cambios de trazado pueden ser una primera respuesta a cambios grandes en el caudal líquido y

sólido (Schumm, 1986). En este tramo Castronuño-Toro, hay evidencias de variaciones de longitud y, por tanto, de pendiente y energía, circunstancias que no concurren en el tramo siguiente, Toro-Peleagonzalo. En cualquier caso, estos cambios de trazado dan lugar una variación espacio-temporal de los índices de sinuosidad que se aprecia, en la diferente sinuosidad de los paleocanales respecto al canal actual.

En este sector los desplazamientos del canal mediante pulsaciones con expansión del mismo, se observan en las transversales Tr2, Tr5 y Tr14. Los cambios de posición entre Tr11 y Tr15, también es posible interpretarlos como una avulsión de este tramo (Fig. 6). Pero es preferible interpretar la transversal Tr14 independientemente del resto, ya que es su dinámica la que se transmite aguas arriba y abajo como se explica a continuación, (Fig. 9).

En esta porción de llanura de inundación, inmediatamente aguas arriba del puente antiguo, se ha diferenciado una secuencia de cuatro canales abandonados y el actual, que se prestan bien a la interpretación evolutiva. En cada posición se aprecia un incremento de la longitud, excepto en el paso a la posición actual en que disminuye (Fig. 9).

El cambio en la tendencia del río entre la posición 4 y la actual debe estar relacionado con la construcción en el siglo XVI de la “bardada”, ancha calzada-dique, que sirvió y sirve, para contener las aguas. Este muro fue levantado como prolongación del puente romano, que resultó dañado a causa de la gran crecida de 1545. Se construye, además, un muro de contención que sufrió graves desperfectos en la crecida de 1600 (Vasallo Toranzo, 1994). Con la primera de estas crecidas, el río cambia bruscamente su trayectoria tendiendo a cerrar el meandro sobre el que estaba situado el puente que queda dispuesto de forma paralela al río (Fig. 10).

El puente, de factura original romana, ya había sufrido importantes intervenciones motivadas por las habituales mutaciones del cauce. Así, en el siglo XII se amplía dotándolo de 17 arcos y en el siglo XIV, fue alargado hacia el sur (Vasallo Toranzo, 1994).

Estos datos, permiten concluir: (1) que en el sector del meandro de Toro (Tr14 y Tr15) las pulsaciones se producen con expansión, por lo que aumenta la longitud y se acentúa la curvatura del

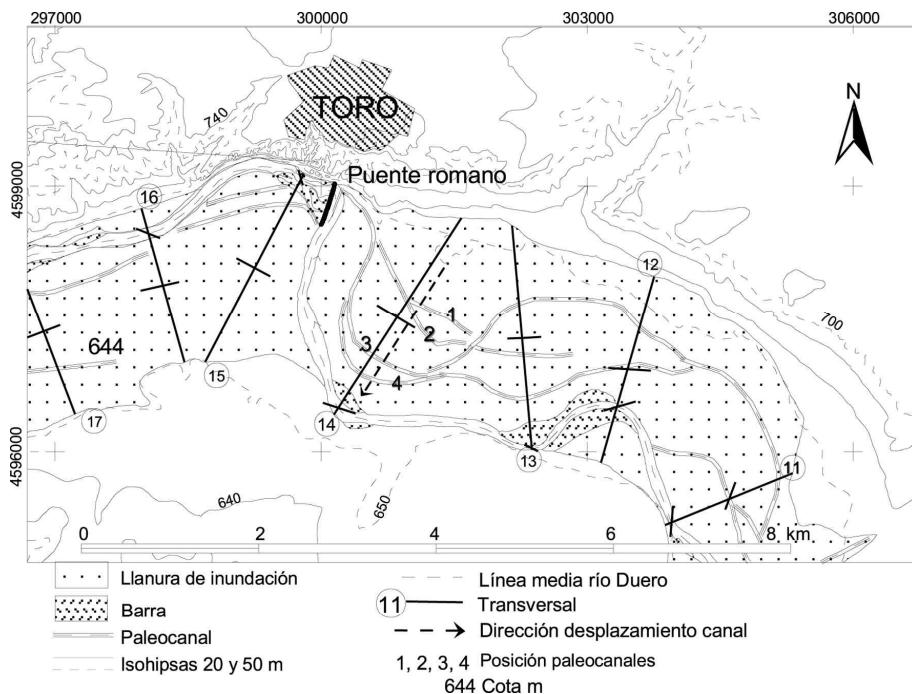


Figura 9. Evolución de las curvas de meandro del Duero en el puente de Toro. Se aprecia la posición del puente romano respecto al cauce actual y la dirección de desplazamiento del canal mediante sucesivas posiciones de los paleocanales (1, 2, 3, 4, actual)

Figure 9. Evolution of meander curves of Duero river in Toro bridge. Note the position of the Roman bridge with respect to the present river course and the direction of displacement of the course from successive positions of paleochannels (1, 2, 3, 4, present).

canal. Ocurren entre la época romana y finales del siglo XVI. (2) Que a finales del XVI, el río ya presentaba un trazado próximo al actual, pues las aguas ya encontraban el muro y la bardada, frenando su tendencia migratoria hacia el sur (Figs. 9 y 10).

En otros casos, entre la posición inicial y final de un meandro, se invierte el sentido de la curva (en Tr10) de manera que la convexidad de los paleocanales es hacia el NE y en el canal actual hacia el SO. En Tr6 se ha producido un acortamiento del antiguo meandro que pasa de 4.821 metros de longitud, a 1.739 (medida realizada entre Tr7 y Tr5, figura 6). En consecuencia, pasa de una posición totalmente marginal, en la que erosionaba la terraza T9 (Fig. 3), a otra moderadamente simétrica (I.A. = 0,36). De esta manera, el área de desplazamiento queda como zona encharcada (*backswamp floodplain*) e inundable (Fig. 6).

La migración de canales afecta, también, al recorrido que sobre la llanura de inundación realizan algunos afluentes. Es el caso del Bajoz, que realiza un cambio de dirección de casi 90° inmediatamente después de recibir al Hornija. De esta forma, el último tramo, se orienta paralelo al Duero, incorporándose a un canal abandonado y alargando su cauce unos 2.500 m (Figs. 3 y 6).

Apoya esta interpretación, aunque no sea una prueba concluyente, la cartografía histórica, en concreto el mapa de Tomás López del partido judicial de Toro de 1784 y el de Coello de la provincia de Zamora de 1863, que muestran para los ríos Bajoz y Hornija, trazados muy diferentes de los actuales. El primero, dibuja la confluencia de estos ríos a la altura de la localidad de Hornija. Esto ha de valorarse en su justa medida habida cuenta que la representación del trazado del Duero es un tanto peculiar pues, por ejemplo, a finales del siglo

XVIII ya estaba bastante marcado el meandro de Toro (Fig. 11, A).

El mapa de Coello, realizado 79 años después, presenta ya una planimetría general más próxima a la de los mapas actuales, como muestra por ejemplo, la delineación de los ríos Duero y Guareña. Y sin embargo, los tramos finales del Bajoz y Hornija tienen, también en este mapa, un aspecto bastante diferente del actual y del de Tomás López (1784), siendo trazados como cauces independientes (Fig. 11, B). Por otro lado, esta representación se aproxima a lo deducido a partir del análisis de los paleo-cauces y la corrobora la descripción que se encuentra en el Diccionario Geográfico de Madoz (Madoz, 1845-1850): "...recibe (el Duero) por la orilla izquierda las aguas del Trabancos y baja a Castronuño... siguiendo luego a Villafranca por cuya jurisdicción abandona la provincia de Valladolid y entra en la de Zamora por el partido y término municipal de Toro, después de desaguar en él por la izquierda el Guareña y por la derecha el Hornija, el Bajoz y el Lobones".

La interpretación que se realiza de la evolución del Bajoz y Hornija, en el contexto de la evolución

de la llanura de inundación, es la siguiente: si se acepta que estos ríos fueron independientes, desembocaban muy próximos entre sí, en un tramo del paleo Duero que podría coincidir con el paleo-cauce que explota hoy el Bajoz (Fig. 6). En algún momento posterior a la descripción de Madoz, el paleo Duero se desplaza hasta la posición actual, esto es, hacia el SO. Ante los nuevos trazados, al Hornija le resulta más corto y fácil incorporarse entonces al Bajoz en lugar de al Duero.

Estos cambios de trazado pueden relacionarse con alguna o algunas de las avenidas que afectaron al Duero entre el último tercio del siglo XVIII y mediados del XIX. Se citan riadas (Bentabol y Ureta, 1900) en 1819, 1834, 1839 en Zamora y Castilla en general. Especial atención merece la de 1858 en Zamora y Valladolid, una de las más graves sufrió el Duero. Considérese en este contexto, que el tiempo que tarda un río en estabilizarse en una nueva posición, puede ser muy variable (Schumm et al., 1996), según las características climáticas e hidrológicas, por lo que todos estos eventos han debido influir en estos hechos.

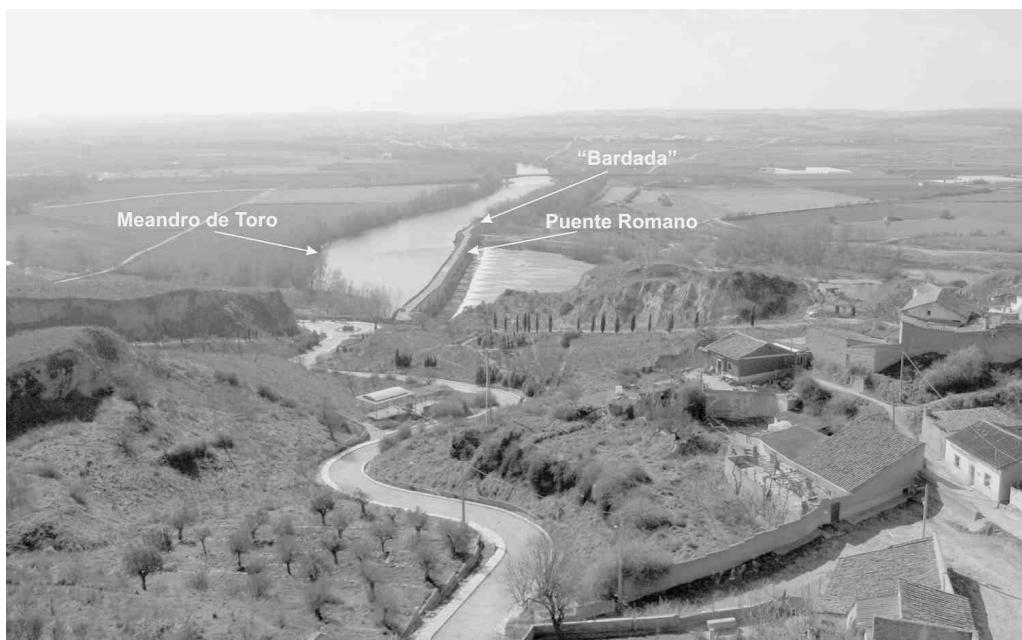


Figura 10. Panorámica del meandro de Toro con el Puente romano. Obsérvese su extremo sur paralelo al cauce.
Figure 10. Panoramic of the Toro meander with the roman bridge. Its south end can be appraised that is parallel to the channel.

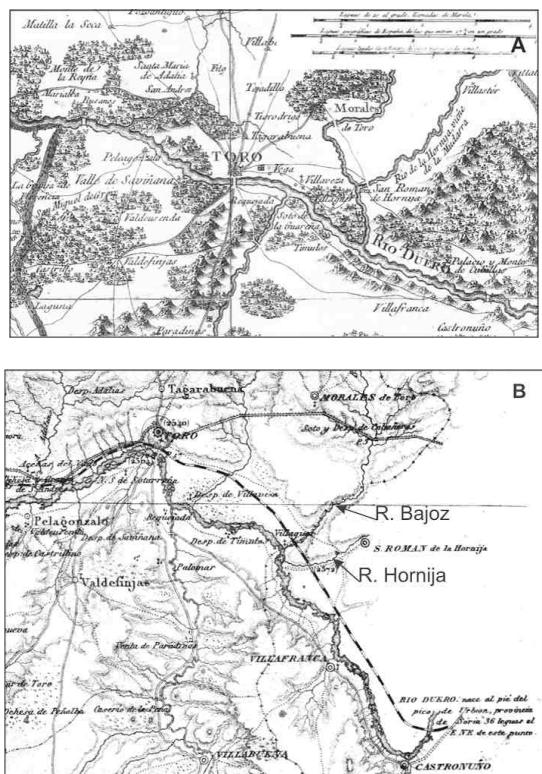


Figura 11. Fragmentos de los mapas de Tomás López (1784) del Partido Judicial de Toro (A) y de Coello (1863) de la provincia de Zamora (B) que muestran para los ríos Bajoz y Hornija, trazados muy diferentes de los actuales.

Figure 11. Map fragment from: A) Tomás López of the Judicial District of Toro (1784) and B) Coello (1863) of Zamora Province.

5.3. Los desplazamientos del canal en el sector Toro-Peleagonzalo

En el segundo sector de la llanura de inundación, asociado al tramo fluvial Toro-Peleagonzalo, el canal sigue un trazado bastante rectilíneo y con tendencia migratoria hacia el norte. Las sucesivas posiciones del canal quedan impresas en paleocanales, igualmente, rectilíneos (Tr16 a Tr21, Fig. 6). La dinámica del cambio de posición obedece, en este tramo, a un modelo diferente al anterior, pues aquí podría asociarse a avulsiones de un canal rectilíneo que no varía de manera notable su longitud, mientras que en el primer sector los cambios de tra-

zado implican, normalmente, una variación de la longitud de los tramos.

Se interpreta, pues, como un modelo de llanura de inundación muy influido en su simetría y trazado del río, por la estructura de los bloques del zócalo infrayacente y el contexto geomorfológico del D.F.D. La tendencia que imprimen estos factores, se ve asimismo favorecida por las intervenciones antrópicas aguas arriba del puente romano (Fig. 9). En efecto, las obras de contención en la orilla sur (Tr14, figura 9) acentuarían la tendencia del río a desplazarse hacia el norte en este tramo. De ser así, los cambios de posición del río serían posteriores al siglo XVI (al menos los relacionados con los paleocanales conservados). Una de las inundaciones más importantes es la que en 1739 arrasó el pueblo de Peleagonzalo (Mimoso Loureiro, 2003). En la figura 6 puede verse la ubicación primitiva del pueblo en plena llanura de inundación.

5.4. Barras y estructuras erosivas

Como formas de depósito de canal vinculadas a la dinámica actual, se desarrollan las barras, que son, a la vez, consecuencia y condicionante de las modificaciones del trazado. Las barras aluviales se encuentran en distintas posiciones: (a) barras laterales, (b) barras centrales, como las que se forman agua abajo del puente romano de Toro y (c) *point bars*, a veces, con topografía a techo ondulado (marcas de la acreción -pequeños *scroll*- o de las turbulencias durante los desbordamientos), (Fig. 6).

Como estructuras de erosión, se están generando en la llanura de inundación estructuras de tipo *scours*, como los que se han observados en la margen derecha del tramo Castronuño-Toro (Fig. 12). Presentan un eje alargado en la dirección del flujo. Estas estructuras son originadas por vórtices durante las crecidas (Knight y Shiono, 1996), se disponen alineadas de manera paralela al canal. En este caso, se formaron en la crecida de enero de 2001. Estas estructuras pueden llegar a coalescer y dejar disponible un surco susceptible de ser ocupado por el agua durante episodios de desbordamiento posteriores. Son un testimonio de los procesos actuales que remodelan la llanura de inundación y podrían ser interpretadas como precursoras de canales.

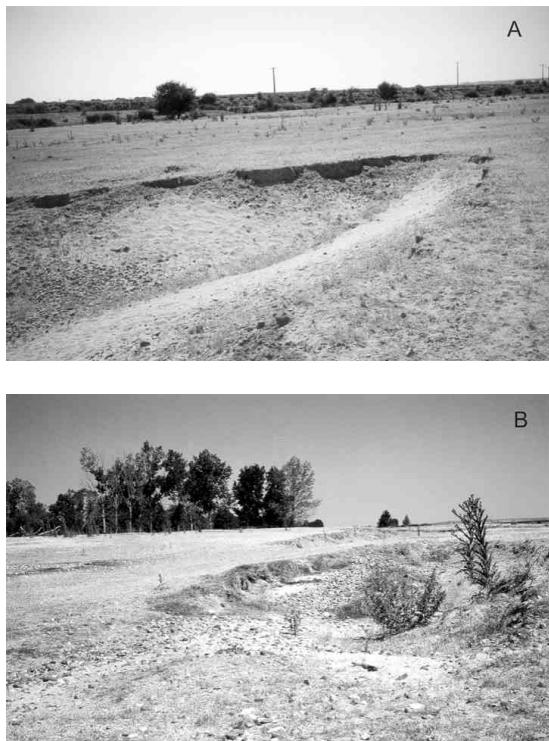


Figura 12. Estructuras erosivas sobre la llanura de inundación, “scours”: A) Muestra la forma alargada en punta de flecha, se aprecian las arenas y gravas que recubren el fondo. B) En esta foto se puede observar una estructura con salida de drenaje cubierta de sedimentos.

Figure 12. Erosive structures on the flood plain, “scours”. A) This photo shows the elongated form in arrow end, the gravels and sands are appraised that cover the bottom. B) Here can be observed a erosive structure with drainage exit covered of sediment.

6. Evidencias históricas de la dinámica fluvial. Relación con crisis climáticas

Mapas antiguos y documentos históricos prestan un gran apoyo para la interpretación de los procesos en la llanura de inundación. En estas fuentes se relatan los hechos catastróficos causados por crecidas o desbordamientos del río. Hay también recopilaciones de eventos climatológicos extraordinarios que interesan por su relación con las variaciones de caudal. En este punto se pretende apuntar algunos datos e ideas para esbozar una explicación de la trascendencia del comportamiento reciente del río en la morfogénesis de la llanura de

inundación, sin abordar el análisis paleoclimático y paleohidrográfico que requerirá un tratamiento más complejo.

En los últimos años se han realizado diversos trabajos en cuencas próximas (Benito et al., 2002; Benito, 2003; Díez Herrero, 2003), en la vertiente mediterránea (Gutiérrez Elorza y Peña Monné, 1998), así como análisis globales para el conjunto de España sobre el cambio climático y la susceptibilidad a las inundaciones (Benito et al., 1996). En todos ellos se expresa la idea de la relevancia que el irregular comportamiento climático e hidrológico tiene para explicar las anomalías hidrodinámicas y que son la base de la sucesión de fases de agradación o incisión.

Sobre el clima en esta parte de la Cuenca del Duero, en tiempos post romanos rige una gran variabilidad climática interanual y fríos extraordinarios (Font Tullot, 1986). Como denominador común prevalece la sequía que hace, por ejemplo, que el río Duero fuera vadeable en el año 901 para las personas en Zamora (Bentabol y Ureta, 1900). Estas condiciones serían favorables para la erosión en las vertientes y los ríos recibirían importantes aportes laterales de sedimentos.

Entre 500 y 1.000 AD se señalan, para la región mediterránea, fases de agradación en los ríos (Benito, 2003). En este sentido, registros polínicos analizados en áreas próximas a la de estudio, indican que el bosque mediterráneo sufrió un retroceso a partir del siglo V. Las sequías y eventuales lluvias torrenciales, favorecen procesos de erosión-acumulación según se infiere de los estudios de yacimientos romanos, post romanos y bajo medievales (Ariño et al., 2002) que implican una mayor disponibilidad de sedimentos para ser transportados por los ríos.

En la base de datos histórica sobre inundaciones que realizan Benito et al., (1996) se recogen más de 2500 registros para España, que comienzan en 181 BC para el Duero. Hay que destacar las grandes crecidas de los ríos de la vertiente atlántica, en general, en el XII y XIII (Benito et al., 1998) y los desbordamientos ocurridos durante los siglos XIII y XIV (recogidas por Bentabol y Ureta, 1900) en el contexto del Periodo Cálido Medieval (entre 1000 y 1300). En la zona que nos ocupa estos extremos están aún por valorar en detalle como, por ejemplo, la influencia de las deforestaciones

sufridas por el territorio relacionadas con las actividades de la Mesta, o la incidencia de fases de agradación-incisión derivadas de estos y otros usos del suelo.

Sobre los desplazamientos del Duero en esta zona la documentación escrita se ha recogido, en parte, en estudios de historia o arte (Vasallo Toranzo, 1994 y Floranes y Encinas, 1994). Se dispone, igualmente, de cartografía antigua. Las noticias y documentos más significativos han sido ya mencionados al tratar la aproximación cronológica sobre las migraciones del canal en tramos concretos (subapartados 5.2 y 5.3). Cabe ahora señalar que los hechos catastróficos que requieren intervenciones en puente y orillas del río, han quedado registrados gracias a la importancia del puente y de la vega. Se trata de obras que, además de reparar daños, intentan controlar las habituales mutaciones del cauce. En este contexto se han citado ya las avenidas de 1545 y 1600.

Pero los eventos extremos continuaron. En 1626, llamado “el año del diluvio”, hubo grandes inundaciones en Valladolid, Salamanca y Zamora. En 1645, otra grande en Toro (Bentabol y Ureta, 1900). Las obras de refuerzo del cauce del Duero continúan, de esta manera a finales del XVII la margen izquierda del río estaba ya prácticamente canalizada a lo largo de más de 1 kilómetro. Como consecuencias de esta contención lateral de las aguas (junto con la disminución de velocidad de la corriente causada por el puente y la curva de su extremo norte), se pudieron transmitir, aguas arriba y abajo, los efectos de los aumentos rápidos e importantes de caudal.

Aún en el siglo XVIII abundan los años con precipitaciones y avenidas extraordinarias (también de muchas sequías), destacando la, ya citada, de 1739 que arrasó Peleagonzalo. En 1788, otra importante crecida, se llevó doce puentes en Castilla y arrasa el pueblo de Fuentes, que fue reconstruido y vuelto a arrasar en 1858.

Los desbordamientos siguieron en el siglo XIX y tuvieron como efecto directo en la zona de estudio, las mutaciones de cauces y que se manifiestan en los recorridos finales de los ríos Bajoz y Hornija sobre la llanura de inundación (apartado 5.2).

En definitiva, las anomalías climáticas e hidrológicas interanuales siguen marcando la dinámica del río y su tendencia migratoria. Las irregularidades extremas más generalizadas (medievales y de

la Pequeña Edad de Hielo entre 1450 y 1700 aproximadamente), tienen aquí efectos desastrosos. Las obras de contención de las aguas realizadas en las orillas del Duero han dejado sentir su efecto en la dinámica fluvial, ya que a no ser por estas construcciones que fuerzan al río ha dirigirse hacia el puente romano, éste habría migrado aún más en la dirección inicial del cambio y que tiende a acortar el meandro.

7. Conclusiones

La morfología del DFD y la configuración de la llanura de inundación son el resultado de una combinación singular de procesos hidrodinámicos, circunstancias ambientales y un marco geomorfológico específico, cuya investigación se ha organizado en el contexto de la cartografía geomorfológica. La líneas básicas de la geomorfología del DFD, se definen así: (a) diferente morfología de las vertientes (longitud e inclinación), según márgenes y disposición de las terrazas; (b) diferentes modelos de trazado, evolución y dirección de desplazamiento de los canales en los tramos fluviales Castromuño-Toro y Toro-Peleagonzalo, asociados a sendos sectores de la llanura de inundación que se relacionan estructuralmente con el bloque Valdelapega-El Caño.

Estas peculiaridades del DFD se desarrollan en dos etapas principales que se detallan a continuación.

7.1. Primera etapa morfogenética: desde la apertura de la Cuenca al Atlántico hasta que se completa el sistema de terrazas

A partir de un relieve asociado a la etapa endorreica de la Cuenca del Duero, la primera etapa del modelado del DFD se inicia con la organización de drenaje atlántico e implica un predominio de procesos erosivos a cargo de la escorrentía superficial. El paleo Duero debió efectuar un paulatino desplazamiento hacia el norte (favorecido por los bloques del zócalo infrayacente y el paleo relieve que afecta al Paleógeno), según marcan los sucesivos niveles de terraza de la margen izquierda (ausentes en la derecha). La erosión a cargo de las aguas superficiales, en diversos estadios de canalización, redu-

ce las superficies previas (residuales actuales), testimonio de la etapa endorreica de la Cuenca del Duero.

7.2. Desde el abandono de la terraza más baja hasta el establecimiento del trazado actual del Duero

La etapa morfogenética siguiente se inicia cuando, marcada ya la asimetría del valle, se establecen las condiciones hidrodinámicas que conducen al desarrollo de la llanura de inundación. Es un ciclo mayor –el de la terraza activa y por tanto actual- que incluye las crisis o irregularidades menores, cuyos efectos se resuelven en cambios de trazado con sus diversos efectos asociados:

- En el tramo Castronuño-Toro se producen cambios de sinuosidad y desplazamientos del canal, que se verifican mediante pulsaciones, o avulsiones, relacionadas con aumentos rápidos del caudal. El nuevo canal comienza a marcarse, posiblemente, a partir de alineaciones de *scours* originados por vórtices durante las crecidas. El desplazamiento del tramo es hacia el SO. En estas modificaciones, prevalece la influencia de las variables hidrodinámicas.
- En el sector Toro-Peleagonzalo la llanura de inundación es más estrecha y los desplazamientos de canal apenas repercuten en el trazado, que se mantiene rectilíneo. Por ello, en esta zona, parecen predominar factores de regulación específicos (de orden más geomorfológico y relacionados con la influencia de bloques infrayacentes).
- Cada uno de los tramos responde, pues, a un modelo de llanura de inundación, en uno dominan los factores hidrodinámicos y en el otro, sin estar ausentes, prevalecen en sus patrones de cambio, los factores geomorfológicos y estructurales. Y en ambos, las obras en torno al extremo sur del puente romano, dejan sentir sus efectos aguas arriba y abajo del cauce.
- Estos procesos ocurren en un contexto climático muy irregular que controla la rapidez y eficacia de los cambios. La Pequeña Edad de Hielo es la crisis climática mayor (que supe-

ra la irregularidad habitual, tiene alcance suprarregional y sobrepasa, climáticamente, el condicionamiento latitudinal de la Península Ibérica) a la que se liga, especialmente, la acentuación del meandro de Toro.

- La irregularidad climática e hidrodinámica posterior, se traduce en cambios de trazado notables que repercuten también en afluentes del Duero. Es lo que ocurre en el tramo final del sistema Bajoz-Hornija, en la segunda mitad del siglo XIX. Esto significa que, en años posteriores a la segunda mitad del siglo XIX, las condiciones que producen variaciones importantes en los trazados fluviales permanecen. Hoy día, a pesar de la regulación de los caudales, las crecidas y la capacidad morfogenética de estos caudales (representada, por ejemplo, en las estructuras erosivas tipo *scour*, activas) confirman que están vigentes las condiciones para que continúen produciéndose importantes retrabajamientos de la llanura de inundación.

Bibliografía

- Allen, J.R.L. (1965): A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediment. *Sedimentology*, 5, 89-191.
- Ariño, E., Riera I Mora & Rodríguez Hernández, J. (2002): De Roma al medievo. Estructura de hábitat y evolución del paisaje vegetal en el territorio de Salamanca.- *Zephyrus*, 55: 268-309.
- Benito, G., Machado, M.J. & Perez Gonzalez, A. (1996): Climate change and flood sensitivity in Spain.- En: BRANSON, J., BROWN, A.G. & Gregory, K.J. (1996): *Global Continental Changes: The Context of Palaeohydrology* 85-98; The Geological Society. Special Publication nº 115.
- Benito, G., Baker, V.R. & Gregory, K.J. (eds.) (1998): *Palaeohydrology and Environmental Change*.- Wiley, New York, 353 pp.
- Benito, G., Sánchez-Moya & Sopeña, A. (2002): Sedimentology of high-stage flood deposits of Tagus river, Central Spain. *Sedimentary Geology*, 160, (1-3), 285-286.
- Benito, G. (2003): Palaeohydrological Changes in the Mediterranean Region during the Late Quaternary. - En: Gregory K.J. & Benito G. (eds.) (2003): *Palaeohydrology. Understanding Global Changes*. Wiley, 123-142.
- Bentabol y Ureta, H. (1900): *Las aguas de España y Portugal*. ITGE, reimpresión, 1995, 347 pp.
- Brown, (1996): Floodplain Palaeoenvironment. En: Anderson, M.G., Walling, P.D. & Bates, P.D. (eds.): *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 95-138.
- Delgado, J. & Alonso Gavilán, G. (2003): Estratigrafía y aproximación a la historia geológica del terciario de la Cuenca

- del Duero entre Zamora y Tordesillas (Valladolid). *Stvdia Geologica Salamanticensia*, 39, 137-167.
- Díez Herrero, A. (2003): Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y SIG para la gestión de riberas. IGME, Madrid, serie tesis doctorales, 2, 596 pp.
- Comisión de aguas del Duero. Datos de las estaciones de aforos nº 62 Toro y nº 66 Carrascal.
- Coello, F. (1863): Mapa de la provincia de Zamora. Atlas de España y sus posesiones de ultramar. Fondo cartográfico Dpto. de Geografía, USAL.
- Corrochano, A. (1977): Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno en la provincia de Zamora. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, 336 p.
- Corrochano, A. (1982): El Paleógeno del Borda Occidental de la Cuenca del Duero, provincia de Zamora. *Temas Geológicos y Mineros*, 6 (2), 687-697.
- Costa Tenorio, M., Morla Juaristi, C. & Sainz Ollero, H. (2001): *Los bosques ibéricos*. Planeta, Barcelona, 597 pp.
- Cox, R.T., Van Arsdale, R. & Harris, J.B. (2001): Identification of possible Quaternary deformation in the northeastern Mississippi Embayment using quantitative geomorphic analysis of drainage-basin asymmetry. *GSA Bulletin*, 113, (5), 615-624.
- Floranes y Encinas, R. (1994): *Memorias de la ciudad de Toro*. Zamora, Semuret, 116 P.
- Font Tullot, I. (1986): Cambios climáticos en la Península Ibérica durante el último milenio, con especial referencia a la "Pequeña Edad Glacial". – En: López Vera, F. (ed.). *Quaternary Climate en Western Mediterranean*. UAM, Madrid, 237- 248.
- García Fernández, J. (1986): *El clima de Castilla y León*, Ámbito, Valladolid, 370 pp.
- Gutiérrez Elorza, M. & Peña Monné, J.L. (1998): Geomorphology and Late Holocene climatic change in Northeastern Spain. – *Geomorphology*, 23, 2-4: 205-217.
- Howard, A.D. (1996): Modelling Channel evolution and Flodplain morphology. En: Anderson, M.G., Walling, P.D. and Bates, P.D. (eds.): *Floodplain Processes* Wiley, Chichester, 95-138.
- Jiménez Fuentes, E. & García Marcos, J.M. (1981): Memoria Mapa Geológico de España, E. 1:50.000. nº 398 Castronuño. -IGME, Madrid, 37 pp.
- Jones, L.S. & Harper, J.T. (1998): Channel avulsion and related processes, and large-scale sedimentation patterns since 1875, Rio Grande, San Luis Valley, Colorado. *GSA Bulletin*, 110, 3, 411-421.
- Knight, D.W. & Shiono, K. (1996): River Cannel and Floodplain Hydraulics. En: Anderson, M.G., Walling, P.D. and Bates, P.D. (eds.): *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 139-181.
- Leopold, L.B. & Bull, W.B. (1979): Base level, aggradation, and grade. - Am. Philos. Soc. Proc. 123, 168-202.
- López, T: 1784: Mapa Geográfico del Partido Judicial de Toro. Madrid, Fondo cartográfico Dpto. de Geografía, USAL.
- Madoz, P. (1845-1850): Zamora Vol. 9, ed. Sánchez Zurro, D. (edición facsímile Diccionario Geográfico-estadístico-histórico de Castilla y León de la edición de Madrid 1845-1850), Valladolid, Ámbito, 1984, 213 pp.
- Martín-Serrano, A. (1988): El relieve de la región occidental zamorana. Inst. de Est. Zamoranos, Zamora, 311 pp.
- Mimoso Loureiro, J. (2003): Efemérides hidrológicas: crecidas y sequías históricas en Portugal. *Hispanagua, Ingeniería Civil*, Cedex, <http://hispanagua.cedex.es/documentación/revistas/Ingcivil/2003/130/art1.htm>
- Mueller, J.E. (1968): An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58, 371-385.
- Nanson G.C. & Croke, J.C. (1992): A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4, 459-486.
- Morisawa, M. (1985): Rivers: form and process. Longman, London, 222 pp.
- O'Connor, J.E., Jones, M.A. & Haluska, T.L. (2003): Flood plain channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. *Geomorphology*, 51, 31-59.
- Pérez González, A. (1982): El Cuaternario de la región central de la cuenca del Duero y sus principales rasgos geomorfológicos. - *I Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero*, IGME, Madrid, II: 717-740.
- Pérez González, A., Martín Serrano, A. & Pol Méndez, A. (1994): Depresión del Duero. – En: Gutiérrez Elorza, M. (ed.): *Geomorfología de España*, Rueda, Madrid, 351-388.
- Plans, P. (1969): Estudio fisiográfico de la Tierra de Campos y de sus sectores marginales. *Boletín de Real Sociedad Española de Historia Natural*. (Geol.), 67, 359-368.
- Sánchez del Corral Jiménez A., Pol Méndez, C. Molina balles-teros, E. & Blanco Sánchez, J. (2002): La Cuenca del Duero: formas y procesos asociados a su colmatación, dinámica fluvial, contacto cuenca-zócalo, exhumación penillanura zamorana y encajamiento de la red fluvial. En: Geomorfología y Paisaje. Guía de excursiones, VII Reunión Nacional de Geomorfología. SEG-Dpto. Geografía UVA, 57-89.
- Schumm, S.A. (1963): Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74, 9, 1089-1100.
- Schumm, S.A. (1986): Alluvial river response to active tectonics. – En: Wallace-Robert, E. (1986): Active tectonics Studies in Geophysics. Washington, D.C. 80-94; Nat. Acad. Press.
- Schumm, S.A. (1993): River response to Baselevel Change: Implications for Sequençal Stratigraphy. - The Journal of Geology, (University of Chicago) 101: 279-294.
- Schumm, S.A., Erskine, W.D. & Tilleard, J.W. (1996): Morphology, hydrology, and evolution of the anastomosing Ovens and King Rivers, Victoria, Australia, *Geological Society of America Bulletin*, 108, 10, 1212-1224.
- Solé Sabarís, L. (1952): *España: Geografía Física*. Vol. 1 de Terán, M. de (director): *Geografía de España y Portugal*. Montaner y Simón, Barcelona, 500 pp.
- Vasallo Toranzo, L. (1994): Arquitectura en Toro (1500-1650). - Tesis doctoral, Inst. de Est. Zamoranos, Zamora, 360 pp.