



LA EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LAS HOCES DEL DURATÓN EN EL MACIZO CALCÁREO DE SEPÚLVEDA (SEGOVIA, ESPAÑA)

*Geomorphologic evolution of the Duraton Canyon in the Sepulveda
calcareous Massif (Segovia, Spain)*

L. M. Tanarro García & J. Muñoz Jiménez

*Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.
Universidad Complutense de Madrid. C/Profesor Aranguren, s/n. Ciudad Universitaria, 28040. Madrid
e-mail: pace@ghis.ucm.es y juliom@ghis.ucm.es*

Resumen: Se plantea una interpretación de la evolución geomorfológica de las hoces de trazado meandriforme modeladas por el río Duratón en el Macizo calcáreo de Sepúlveda desde las primeras fases del establecimiento del valle hasta el presente. Dicha interpretación se apoya en el reconocimiento, la cartografía detallada y el análisis de una serie de niveles de acumulación fluvial que se encuentran de forma discontinua en las vertientes de las Hoces y en la cara interna de los meandros encajados. La altura relativa de estos niveles respecto al lecho actual del río ha permitido no sólo establecer las diferentes fases del encajamiento, sino valorar en qué medida estuvieron controladas por los caracteres morfoestructurales del Macizo. La configuración 'anticlinorial' de éste condicionó, de un lado, la extensión y el espesor de los sedimentos detríticos terciarios que recubrieron los estratos calcáreos cretácicos fuertemente deformados y provocó, de otro, un desplazamiento lateral del valle y un crecimiento más acusado de los meandros desarrollados en conformidad con el buzamiento de las capas.

Palabras claves: meandros encajados, meandros en crecimiento, Hoces del Duratón, Macizo de Sepúlveda.

Abstract: This study interprets the geomorphologic evolution of the meandering canyon incised by the Duraton River in the Sepulveda calcareous Massif. Field observations, detailed mapping and analysis of discontinuous terraces of fluvial deposits occurring on the canyon walls and inner face of the entrenched meanders, were used to trace canyon development from the initial stage of valley formation to the present. A comparison of the elevation of the terraces in relation to the present river bed revealed several stages of incision, and determined the degree to which the massif's morphostructural features impacted terrace formation. The massif's 'anticlinorial' configuration influenced the extension and thickness of the Tertiary detrital sediments that cover the highly deformed Cretaceous calcareous beds, causing a lateral displacement of the valley, which intensified the formation of meanders relative to the dip of sedimentary strata.

Keywords: incised meanders, ingrown meanders, Duraton canyon, Sepulveda Massif.



L. M. Tanarro García & J. Muñoz Jiménez (2010). La evolución geomorfológica de las Hoces del Duratón en el macizo calcáreo de Sepúlveda (Segovia, España). *Rev. C. & G.*, 24 (1-2), 113-134.

1. Introducción

El río Duratón, que tiene su cabecera en el conjunto montañoso de Somosierra, junto con sus afluentes los ríos San Juan y Caslilla, que nacen en la vertiente septentrional de la sierra de Guadarrama, han modelado, al penetrar y adentrarse en el denominado Macizo calcáreo de Sepúlveda, un conjunto de tramos de valle con rasgos morfológicos típicos de los cañones u hoces, siendo las denominadas Hoces del Duratón el más largo, profundo y espectacular de ellos (Fig. 1).

El Macizo de Sepúlveda, vinculado al bloque satélite de La Serrezuela, está constituido exclusivamente por litofacies del Cretácico Superior, de

naturaleza dolomítica en su práctica totalidad, rodeadas a modo de orla por conglomerados calcáreos paleógenos. Y se encuentra localizado unos 20 km al Norte de los conjuntos montañosos del Sistema Central antes citados y elevado respecto a la cuenca sedimentaria del Duero. Desde un punto de vista geológico, los materiales que constituyen el Macizo proceden de sedimentos detríticos siliciclásticos de origen continental y sobre todo de sedimentos carbonatados de origen marino depositados durante el Cretácico Superior en varios ciclos de transgresión y regresión (Alonso, 1981; Alonso et al., 1982; ITGE, 1993a, 1993b; Gil et al., 2004, 2008), habiéndose diferenciado en ellos siete formaciones litoestra-

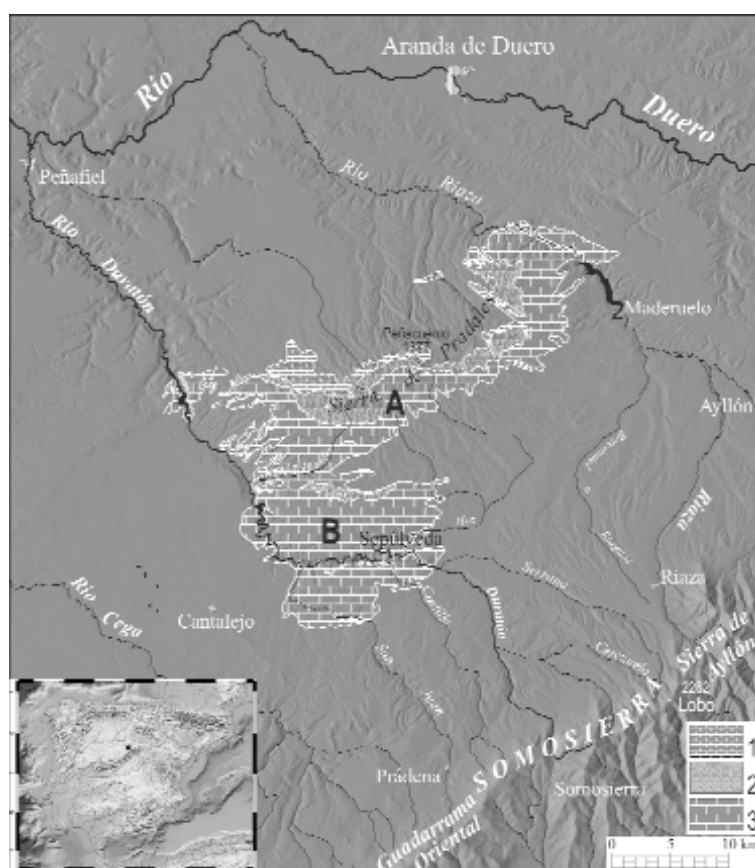


Figura 1. Localización del Macizo de Sepúlveda-La Serrezuela, incluyendo las unidades de La Serrezuela o Sierra de Pradales (A) y del Macizo calcáreo de Sepúlveda (B); en esta última se modelan las Hoces del río Duratón. 1. Serie carbonática del Jurásico; 2. Serie detrítico-carbonática del Cretácico Superior; 3. Serie carbonática del Cretácico Superior.

Figure 1. Location of the Sepúlveda-La Serrezuela Massif, that includes the units of the "Serrezuela" or Pradales (A) and the Sepúlveda calcareous Massif (B). In the last one is located the Duraton Canyon. 1. Jurassic carbonatic series; 2. Upper Cretaceous detritic and carbonatic series; 3. Upper Cretaceous carbonatic series.

tigráficas. De acuerdo con la división realizada por Alonso (1981), estas formaciones se organizan en dos grupos: el 'grupo inferior terrígeno' (Cenomanense-Turonense superior) y el 'grupo superior carbonatado' (Coniacense inferior-Campaniense). El primero corresponde a depósitos de carácter detrítico y está compuesto por arcillas, arenas, gravas y conglomerados con intercalaciones de niveles calcáreos. El segundo, procedente de sedimentos organógenos de facies marina, está constituido por calizas dolomíticas, dolomías y areniscas dolomíticas. Este último grupo comprende un 'paquete' de material carbonático, cuya potencia puede superar los 100 m, definido por su alto grado de litificación, su estructura en bancos masivos y su textura fina (limo-arenosa) y, sobre él, una serie de espesor análogo formada por una alternancia de lechos o bancos estrechos de roca dolomítica con tramos margosos.

Estas formaciones yacen sobre el zócalo varisco de la Península Ibérica, formando una cobertera sedimentaria, que se vio afectada, junto con él, por las fases tectónicas alpinas, en relación con la más importante de las cuales, la 'fase de Guadarrama' (Capote et al., 1990), se produjo el levantamiento como bloques montañosos de tipo *pop up* (*horst* cabalgante) de los tramos medios y orientales del Sistema Central. Según las interpretaciones más recientes, se puede decir que la estructura del borde Norte del sector oriental de la Sierra de Guadarrama y de Somosierra, así como su enlace con la cuenca del Duero en el área de Sepúlveda-La Serrezuela, responde a una secuencia de cabalgamientos imbricados vergentes hacia el N y el NW (Andeweg et al., 1999; De Vicente et al., 1996, 2007). Esta tectónica de cabalgamientos ha articulado el Macizo de Sepúlveda en un conjunto de escamas imbricadas del zócalo y la cobertera cretácica: concretamente, estas fallas inversas de dirección E-W y con progresiva incurvación hacia el SW en su tramo occidental, lo organizan en tres estrechas y largas escamas cabalgantes. Con sólo entre 2 y 4 km de anchura, presentan éstas un aumento de elevación estructural progresivo aunque moderado (en torno a los 100 metros) de Sur a Norte, de modo que las unidades desplazadas han experimentado un levantamiento mayor a medida que se alejan en este sentido de los relieves axiales del Guadarrama

oriental y Somosierra. Debido a la moderación del desplazamiento, las fallas inversas que separan dichas escamas —o bloques cabalgantes— no suelen fracturar la cobertera, sino deformarla, originando pliegues 'en rodilla' o monoclinales vergentes al N. En ellos los flancos septentrionales son cortos y presentan una notable inclinación estructural (superior a 60°), pudiendo encontrarse con frecuencia en disposición vertical o volcada, mientras que los flancos meridionales son extensos y muestran una suave inclinación, inferior casi siempre a los 10°, hacia el S, SE y SW (Cadavid et al., 1971; Gómez y Babín, 1998; Babín y Gómez, 1997).

Aunque las acciones de denudación sintectónicas y postectónicas fueron importantes como pone de manifiesto la presencia de una orla de conglomerados calcáreos y arcillas, en las tres escamas que constituyen el Macizo de Sepúlveda se conservan en una medida notable las estructuras plegadas de la cobertera cretácica, cuyos componentes litoestratigráficos van aflorando a modo de fajas según el mayor o menor salto de los cabalgamientos. Los procesos erosivos se han centrado prioritariamente en los flancos septentrionales, más cortos y forzados, y en el núcleo de los anticlinales, respetando en mayor medida y realzando el papel morfoestructural de los flancos meridionales, más extensos y tendidos. Estos aparecen hoy como grandes monoclinales, a modo de cuestas, reconociéndose, de S a N, tres: el monoclinal de Sepúlveda, el monoclinal de Villaseca y el monoclinal de Aldehuela-Hinojosa del Cerro (Fig. 2).

En este marco litológico y morfoestructural, el río Duratón ha excavado sus Hoces, cañón profundo y estrecho de 34 km de longitud cuyo rasgo más sobresaliente es la marcada sinuosidad de su trazado, constituido por una espectacular sucesión de meandros encajados.

2. Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es plantear la interpretación global de la evolución geomorfológica de las Hoces del Duratón en el Macizo de Sepúlveda utilizando como base y fuente de información principal un análisis completo,



Figura 2. Corte geológico idealizado que muestra la configuración morfoestructural del Macizo de Sepúlveda. **Litología:** 1. Conglomerados cuarcíticos, areniscas, arcillas, margas, dolomías y arenas y arcillas versicolores del Cretácico Superior; 2. Dolomías y calizas del Cretácico Superior; 3. Dolomías masivas del Cretácico Superior; 4. Dolomías tableadas y margas del Cretácico Superior; 5. Conglomerados calcáreos y arcillas rojas del Eoceno-Oligoceno; 6. Arenas y arcillas del Mioceno. **Tectónica:** 1. Cabalgamiento de Burgomillodo-Valle de Tabladillo-Urueñas; 2. Cabalgamiento de Villaseca-Castrillo de Sepúlveda; 3. Cabalgamiento de Sepúlveda-Villar de Sobrepeña.

Figure 2. Geologic cross-section displaying the Sepúlveda Massif's morfoestructural configuration. **Lithology:** 1. Conglomerates of quartzite, sandstone, clays, marls, dolomites, sands and clays of the Upper Cretaceous; 2. Upper Cretaceous dolomites and limestones; 3. Upper Cretaceous massive dolomites; 4. Upper Cretaceous laminated dolomites and marls; 5. Calcareous conglomerates and red clays from the Eocene-Oligocene; 6. Miocene sands and clays; **Tectonics:** 1. Burgomillodo-Valle de Tabladillo-Urueñas thrust fault; 2. Villaseca-Castrillo de Sepúlveda thrust fault; 3. Sepúlveda-Villar de Sobrepeña thrust fault.

detallado y preciso de las formas y formaciones existentes en ellas y en su entorno inmediato. Se ha elaborado para ello una cartografía geomorfológica a escala 1:10.000 (Tanarro, 2002), cuyo levantamiento ha llevado a reconocer, a partir de un trabajo de campo exhaustivo, una serie de niveles de acumulación fluvial (NAF) cuyos restos se acogen tanto en las paredes de las propias Hoces como en emplazamientos exteriores a ellas, a veces relativamente alejados de los bordes actuales del cañón. Estos niveles aluviales, que aparecen como retazos colgados de reducidas dimensiones difíciles de localizar en este tipo de valles estrechos y escarpados (Hernández Pacheco, 1932; González Amuchástegui, 1993; Fernández Fernández, 1996), han sido cartografiados y analizados desde el punto de vista granulométrico y morfométrico y se han ubicado de forma precisa en una serie de perfiles morfotopográficos que constituyen una valiosa fuente de información para interpretar el proceso de encajamiento del Duratón en el roquedo calcáreo del Macizo de Sepúlveda.

El interés de la investigación radica en el hecho de que después de numerosos trabajos que se han efectuado a lo largo de varias décadas aun no existe acuerdo acerca de cómo se produjo la instalación y el encajamiento del río Duratón en las estructuras plegadas del Macizo de Sepúlveda, ni acerca de las causas de la sinuosidad del trazado de las Hoces que en ellas ha modelado.

3. Antecedentes

Este profundo encajamiento y este trazado marcadamente meandriforme de las Hoces modeladas por el Duratón han suscitado toda una serie de interrogantes o problemas de interpretación que no han resultado fáciles de resolver, tal como se desprende de los estudios realizados por quienes desde los años sesenta del pasado siglo han investigado y tratado de explicar su configuración geomorfológica y su encuadre en el ámbito territorial y en el contexto morfoestructural donde se ubican (Bravard, 1965; Bullón Mata *et al.*, 1978; Eraso *et al.*, 1980; Cascos Maraña, 1991; Díez Herrero *et al.*, 1996; Barea, 2001; Calonge y Díez Herrero, 2002; Díez Herrero y Martín Duque, 2005).

En 1965 Yves Bravard alude a un fenómeno de epigénesis o sobreimposición como principal causa para explicar la instalación de la red hidrográfica meandriforme organizada en torno al río Duratón en el relieve plegado dolomítico del Macizo de Sepúlveda. Este autor dice literalmente que “el relleno mioceno ha podido fosilizar la parte meridional del Macizo de Monterrubio, es decir, la zona plegada de Sepúlveda” y ello ha permitido que el trazado sinuoso adquirido sobre un roquedo detrítico suelto por los cursos principales de dicha red haya quedado impreso en las estructuras calcáreas cretácicas subyacentes. De este modo el

patrón fuertemente incurvado de las actuales hoces no tiene ningún tipo de control estructural y es resultado directo de la sobreimposición de un trazado previo desarrollado en un marco topográfico y litológico favorable a la génesis y al desarrollo de meandros.

Sin embargo, algunos años más tarde, en varias publicaciones sobre el modelado kárstico existente en las Hoces dirigidas por A. Eraso (Bullón Mata et al., 1978; Eraso et al., 1980) se afirma que el trazado sinuoso del cañón no deriva de la epigénesis directa de un curso meandriforme, ya que el primer testimonio del encajamiento del Duratón en el macizo calcáreo es un “paleovalle” de 150 m de ancho y trazado rectilíneo, los restos de cuyo fondo plano quedan hoy colgados varias decenas de metros por encima del lecho fluvial actual. A partir de la definición de esta forma de erosión fluvial, que habría sido excavado en una primera fase de incisión por un río inicialmente establecido sobre una superficie de erosión o ablación kárstica, se propone una interpretación según la cual las Hoces son resultado de una segunda fase de incisión en el fondo del indicado “paleovalle” desarrollada por el curso de agua “siguiendo su dirección principal, pero formando meandros frecuentes y acusados que contrastan con la línea recta que dibuja aquél”. Y se concluye además que la sinuosidad ha sido motivada y controlada prioritariamente por factores estructurales, ya que son precisamente “las direcciones preferenciales del diaclasado las que condicionaron el desarrollo de los meandros”. Éstos serían la consecuencia de la forma de ataque que adoptó el río al profundizar su cauce en las series de rocas carbonáticas, aprovechando la estructura tectónica de detalle (fallas pequeñas, diaclasas, etc.) que en ellas se encuentra (Eraso et al., 1980).

En un estudio posterior referente al Macizo de la Serrezuela de nuevo se alude a un fenómeno de sobreimposición para interpretar el profundo encajamiento del Duratón –acompañado por el desarrollo de meandros encajados– que se observa en el borde occidental de esta unidad morfoestructural, concretamente en el afloramiento calcáreo de Fuentidueña, situado unos 12,5 km aguas abajo de la terminación de las Hoces modeladas por este río en el Macizo de Sepúlveda. Su autor, C. Cascos Maraña, considera que esta

interpretación está sólidamente fundada en las evidencias de que este afloramiento cretácico de moderada elevación estructural resultó totalmente fosilizado al término del Mioceno por los sedimentos detríticos del Vallesiense, sobre los cuales se instaló y evolucionó inicialmente la red de cursos de agua (Cascos Maraña, 1991).

Las ideas mantenidas por Eraso et al. (1980) son retomadas unos años más tarde por Díez Herrero et al. (1996), los cuales vuelven a señalar que el cañón actual se encuentra encajado profundamente dentro de un “paleocauce” no sinuoso, inscribiendo en el fondo de éste un surco de trazado meandriforme enmarcado por escarpes que llegan a superar los 100 m de desnivel. Este “notable aumento de la sinuosidad entre el paleocauce y el cañón actual” consideran que “podría estar relacionado con un aumento de la pendiente como consecuencia de la neotectónica pleistocena” y concluyen, en consecuencia, que el modelado de las Hoces sería resultado de “una combinación de antecedencia y sobreimposición”, en la que “se distinguen al menos dos episodios de encajamiento netos”.

En un trabajo más reciente Díez Herrero y Martín Duque (2005) reafirman esta idea de que “la incisión del cañón del Duratón se produjo en dos etapas claramente diferenciadas: una etapa inicial en la que el Duratón formó un primer valle ancho y poco profundo (paleovalle); y una etapa final, que aún continúa, en la que ha sufrido un rápido y profundo encajamiento de más de 60 m, formando el cañón propiamente dicho (estrecho y de paredes verticalizadas), que ocupa una estrecha banda del lecho del antiguo paleovalle”. Para estos autores, las causas de este encajamiento reciente podrían ser un ligero levantamiento neotectónico de las estructuras del Macizo de Sepúlveda o bien un repentino descenso del nivel del mar durante uno de los períodos glaciares del Cuaternario, que hizo bajar de cota el perfil longitudinal del río Duero y, en consecuencia, el de todos sus afluentes, entre ellos el Duratón. Así mismo, estos autores señalan que el trazado meandriforme de las Hoces puede deberse a un basculamiento tectónico ligero del Macizo, capaz de controlar la pendiente y el trazado de los cursos fluviales, favoreciendo en éste el desarrollo de incurvaciones.

4. Los niveles de acumulación fluvial y su significado para la interpretación de la evolución geomorfológica de las Hoces del río Duratón

Aunque en trabajos previos se ha aludido a la existencia en las Hoces del Duratón de algunos restos de depósitos aluviales asociables a terrazas degradadas (Eraso et al., 1980; Bullón Mata et al., 1978; Díez Herrero et al., 1996; 2005), en ningún momento se los identificó cartográficamente ni se estableció de forma precisa su cota relativa con respecto al cauce actual del río.

Estos retazos pedregosos de topografía aplanada y disposición escalonada se asemejan a los que en otros cañones se han interpretado como restos de niveles de acumulación fluvial que, al igual que ellos, se caracterizan por la precariedad y la escasa potencia de los depósitos –reducidos a un recubrimiento superficial de gravas y cantos sueltos–, por su reducida extensión y por su escasa expresividad geomorfológica, al no aparecer como verdaderas terrazas desde el punto de vista morfológico, aunque sí desde el punto de vista sedimentológico (Fernández Fernández, 1996).

En concreto, se han podido identificar durante el levantamiento del mapa geomorfológico a escala 1:10.000 algo menos de un centenar de estos retazos aluviales que han permitido reconstruir una secuencia de 10 niveles de acumulación fluvial colgados, los cuales se han agrupado en tres conjuntos: ‘niveles bajos’ (+2-3 m, +5-7 m, +12-15 m, 18-20 m), ‘niveles medios’ (+25-30 m, +40-45 m, +50-60 m) y ‘niveles altos’ (+65-75 m, +85-95 m, +105-110 m). Y es de destacar que la mayor parte de los enclaves o rellanos corresponden a los niveles altos, descendiendo su número conforme su cota relativa se aproxima al cauce por donde hoy circula el río Duratón, hasta el punto que los niveles bajos sólo aparecen de forma muy puntual o esporádica.

Desde un punto de vista granulométrico y morfométrico, los depósitos que en ellos se encuentran tienen una facies inequívocamente fluvial y están constituidos mayoritariamente por cantos de cuarzo y en menor medida de cuarcita, que muestran elevados índices de desgaste (Tanarro, 2006) (Tabla I). La indicada composición

litológica permite asegurar que el área de procedencia principal de estos depósitos de cantos rodados se localiza en los materiales miocenos y en las formaciones de raña del sector de la cuenca ‘terciaria’ situado al Este de Sepúlveda, donde el Duratón y sus afluentes han modelado, antes de penetrar en el Macizo cretácico, un completo sistema de terrazas cuyas alturas relativas se correlacionan bastante bien con los niveles de acumulación fluvial reconocidos en las Hoces (Muñoz y Tanarro, 2002). De igual modo, las cotas relativas de estos niveles vienen a coincidir básicamente con las reconocidas en el conjunto de terrazas construido por el río en su tramo bajo, entre su salida de los afloramientos dolomíticos y su desembocadura en el Duero (ITGE, 1997).

Dentro del ámbito de las Hoces del Duratón los testigos de estos niveles fluviales se encuentran preferentemente en dos sectores (Fig. 3):

a) En las altas laderas de transición, que, con una pendiente moderada, enlazan las superficies culminantes del Macizo de Sepúlveda con las paredes escarpadas del cañón propiamente dicho. Estos retazos aluviales altos aparecen con mayor profusión en los tramos oriental y occidental de las Hoces y tienen una presencia más reducida en el tramo central.

b) En la cara interna de algunos meandros, donde se conservan rellanos detríticos correspondientes a uno, a dos o, excepcionalmente, a tres niveles de acumulación fluvial escalonados. Son relativamente numerosos y aparecen sobre todo en las laderas de la orilla derecha del valle (al N y el E del trazado actual del río), acogiéndose siempre en la margen convexa de los meandros que se desarrollan conforme al buzamiento de los estratos cretácicos.

Los resultados de las observaciones de campo y de la cartografía geomorfológica detallada de las Hoces y de su entorno, así como el análisis de la localización planimétrica y altimétrica de los ‘niveles de acumulación fluvial’, han permitido proponer la reconstrucción del proceso de encajamiento del río Duratón en el Macizo de Sepúlveda, desde los momentos iniciales de su instalación hasta el modelado actual del cañón, en los términos que se expone en los dos apartados siguientes.

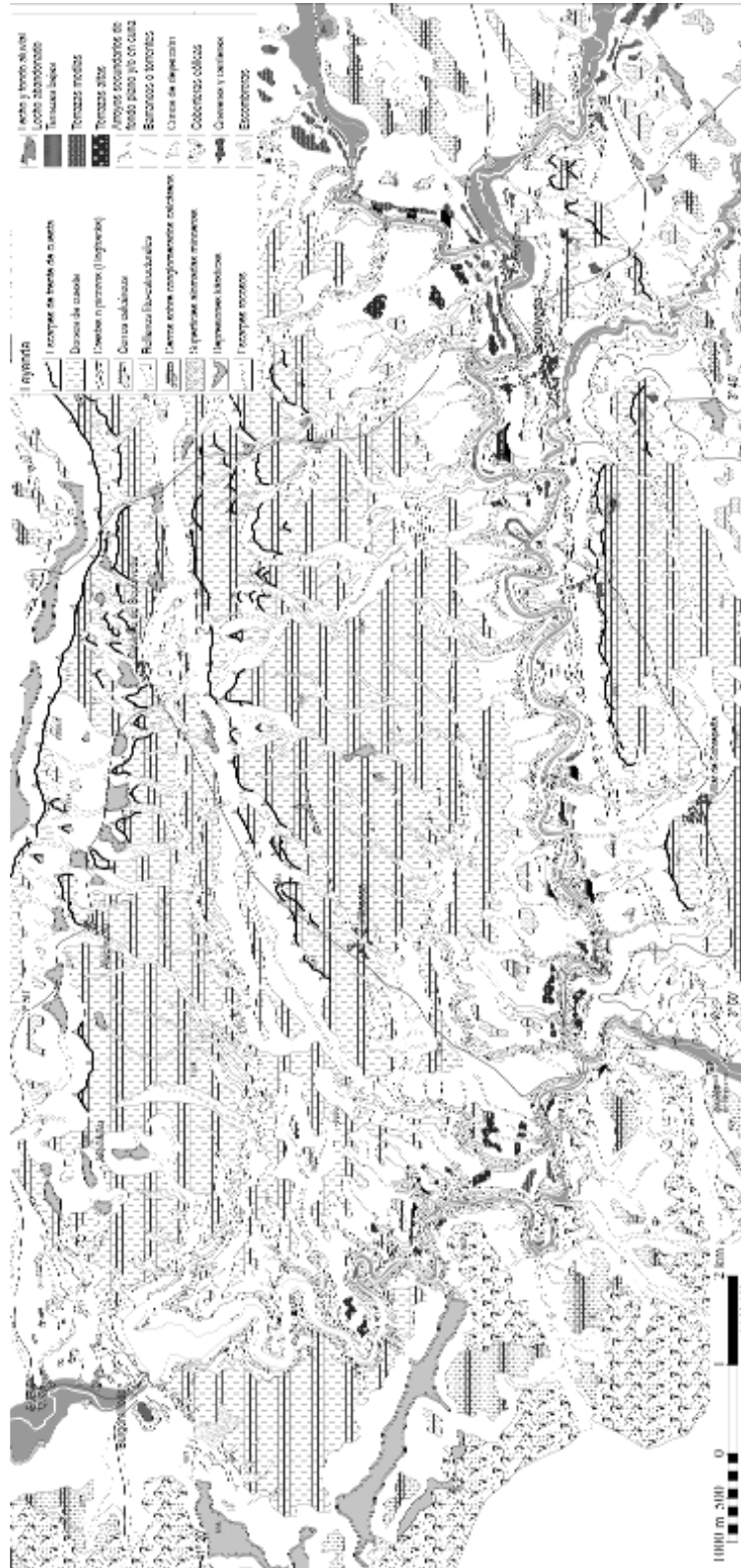


Figura 3. Mapa geomorfológico de las Hoces del Duratón (simplificado de Tanarro, 2002).
 Figure 3. *Geomorphologic map of the Duratón Canyon (simplified, Tanarro 2002).*

Tabla 1. Síntesis de los rasgos granulométricos, litológicos y morfológicos de los niveles de acumulación fluvial de las Hoces del Duratón.
 Table 1. *Synthesis of granulometric, lithological and roundness features of the fluvial accumulation levels of the Duratón Canyon.*

Granulometría (mm)	NAF +105-110 m %	NAF +92-100 %	NAF +82-87 m %	NAF +60-67 m %	NAF +48-50 m %	NAF +27-35 m %	NAF +18-20 %	NAF +12-15 m %	FONDO ACTUAL %
20-40	33,3	32,3	29,0	30,8	35,1	31,4	19,8	23,8	53,9
40-60	38,6	45,2	35,3	35,7	38,8	36,3	38,6	34,7	30,7
60-80	21,5	15,2	18,8	22,1	15,0	16,2	23,8	18,8	9,8
80-120	5,9	6,9	14,2	9,9	8,9	12,5	14,9	16,8	4,5
120-240	0,7	0,3	2,6	1,5	2,0	3,6	3,0	5,9	1,0
>240	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0	0,0	0,0	0,2
Mediana (mm)	46	46	49	51	45	48	52	52	38
Centilo (mm)	154 (cuarcita)	121 (cuarzo)	196 (cuarzo)	186 (cuarcita)	275 (cuarzo)	194 (cuarzo)	194 (cuarzo)	215 (cuarzo)	257 (caliza)
Composición litológica global	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Cuarzo	80,9	85,5	81,2	79,9	79,9	72,9	87,1	69,8	42,5
Cuarcita	16,2	13,2	14,2	17,1	16,8	21,1	2,0	13,4	4,1
Rocas metamórficas	0	0	0	0	0,2	0	0	3,5	5,0
Rocas filonianas	0	0	0,7	0	0,7	0,7	6,9	2,40	2,5
Calizas	3,0	1,3	4,0	3,0	2,5	5,3	4,0	11,4	42,8
Restos de cerámica	0	0	0	0	0	0	0	0	3,1
Morfometría (Cuarzos 40-60 mm)									
<i>Índice de desgaste</i>									
% <100	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0,6
% 100-200	7,3	4,7	5,1	4,8	4,9	5,5	5,3	7,3	16,6
% 200-300	27,6	35,2	28,8	28,9	23,6	28,8	30,5	30,7	42,8
% <300	65,1	60,2	65,8	66,3	71,5	65,8	64,2	62,0	39,9
Mediana	339	317,0	340,4	340,4	363,6	341,5	320,5	327,9	272,7

5. El relieve previo a la instalación del río Duratón en la estructura plegada del Macizo de Sepúlveda

El levantamiento como *horst* cabalgante (*pop-up*) de sector oriental del Sistema Central sobre las estructuras que conforman el piedemonte Norte de Guadarrama y Somosierra y el Macizo de Sepúlveda supuso la activación de un importante ciclo sedimentario relacionado con la erosión de estas nuevas elevaciones durante y con posterioridad a dicho levantamiento (Garzón et al., 1982; Fernández García, 1988; Pedraza, 1994). La instalación de torrentes en las laderas dio lugar a la formación de grandes abanicos aluviales coalescentes y de extensos *glacis* de acumulación que fueron rellenando a lo largo del Mioceno la franja tectónicamente deprimida que separaba dichos relieves de los bloques cabalgantes del Macizo satélite de La Serrezuela ('subcuenca sedimentaria de Sepúlveda-Ayllón'). Puede deducirse, en función de los valores de altura de los cerros o altiplanicies conservados en la parte más elevada de esta subcuenca (entre 1090 y 1105 m) (Tanarro, 2006), que a finales del Neógeno el ciclo de acumulación sedimentaria había llegado a conformar una planicie de colmatación que, por un lado, enrasaba con el piedemonte erosivo de Somosierra (e incluso lo fosilizaba parcialmente) y, por otro, se prolongaba hasta el Macizo de Sepúlveda, el cual quedaba enterrado en su práctica totalidad bajo los sedimentos detríticos del relleno mioceno, el espesor de los cuales estaba condicionado dentro de su ámbito por la configuración morfoestructural y registraba fuertes desigualdades.

Tal como se ha indicado, el Macizo de Sepúlveda está compuesto por tres escamas o bloques del basamento a las que se asocia una potente cobertera cretácica, elevada y plegada en una serie de tres anticlinales, definiendo en conjunto una configuración tectónica de tipo anticlinorio. Estos anticlinales muestran una disposición fuertemente disimétrica, con flancos cortos y de fuerte buzamiento hacia el N y NW y flancos extensos de moderada pendiente estructural hacia el S y el SE. El tramo central de las deformaciones registra un mayor levantamiento, mientras que hacia sus extremos el valor de este

'salto' desciende de forma progresiva y rápida hasta prácticamente hacerlas desaparecer. Teniendo en cuenta esta peculiar configuración y las alturas de los testigos que aún se conservan de la planicie de colmatación de la 'subcuenca sedimentaria de Sepúlveda-Ayllón', puede concluirse que al término del ciclo de sedimentación neógeno todo el sector meridional del Macizo de Sepúlveda, correspondiente a los flancos tendidos o 'dorsos' del anticlinorio, se encontraba fosilizado por sedimentos detríticos, aunque el espesor de éstos variaba, incrementándose de N a S y del centro hacia los extremos oriental y occidental. Por el contrario, las partes más elevadas –y arrasadas– del sector septentrional, correspondientes a los ejes y a los 'frentes' del conjunto estructural, sólo estaban levemente recubiertas o incluso llegaban a aflorar, enrasando con la propia superficie de colmatación sedimentaria (Fig. 4 y 5).

Sobre este relieve previo se establecieron el río Duratón y sus afluentes el Caslilla y el San Juan y a partir de él, sobre el recubrimiento detrítico neógeno que fosilizaba del modo indicado el Macizo de Sepúlveda, realizaron inicialmente su labor de incisión y modelado. Tal como se ha constatado en otras áreas, los caracteres litológicos y sedimentológicos del indicado recubrimiento, en concreto su escasa compacidad y el relativamente bajo calibre de las partículas que lo forman, son muy propicios para que se desarrolle una morfodinámica fluvial capaz de modelar lechos móviles de tipo meandriforme (Muñoz y Palacios, 1990).

Según esto, puede interpretarse que el trazado fuertemente sinuoso de las hoces modeladas por el Duratón se debe genéricamente a un proceso de sobreimposición o epigénesis, como consecuencia del cual los meandros que se trazaron en la cobertera detrítica neógena se mantuvieron cuando el río comenzó a excavar los materiales dolomíticos y calizos del Cretácico. Sin embargo, tomando en consideración toda la información proporcionada por la cartografía geomorfológica detallada –en especial la derivada de la interpretación de los diferentes niveles de acumulación fluvial identificados al realizar su levantamiento–, puede afirmarse que este proceso de encajamiento del curso meandriforme del río Duratón en el Macizo de Sepúlveda fue complejo y

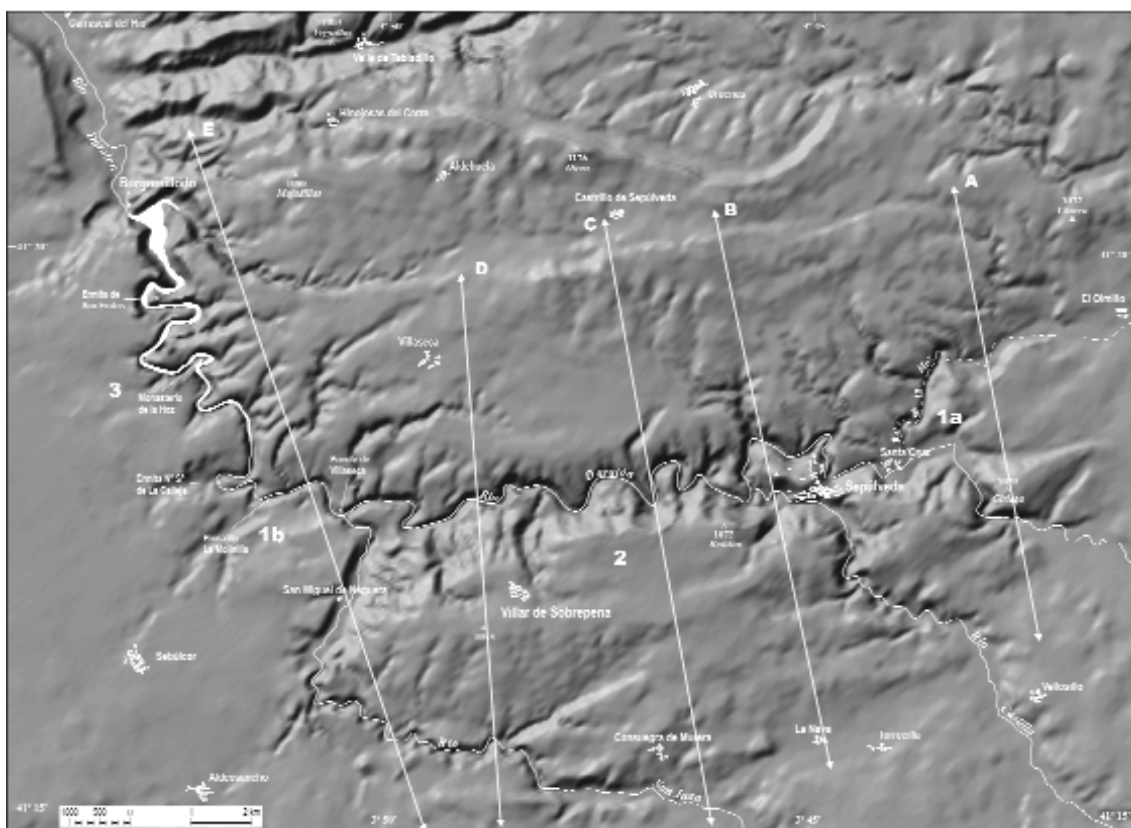


Figura 4. Modelo Digital del Terreno (MDT) del Macizo de Sepúlveda y delimitación de los diferentes sectores de las Hoces del Duratón según su adaptación a la configuración morfoestructural 'anticlinal' del Macizo. 1. Extremos laterales (1a): sector de Santa Cruz y (1b): sector de la Presa de la Molinilla-Ermita N^o Señora de La Calleja; 2. Sector central (Sepúlveda-Puente de Villaseca) y 3. Borde occidental (Ermita N^o Señora de La Calleja-Presa de Burgomillado). Las flechas indican la posición de los cortes geológicos idealizados de la figura 5.

Figure 4. Digital Terrain Model (DTM) of the Sepúlveda Massif and the delimitation of the sectors of the Duratón Canyon identified according to their adaptation to the 'anticlinal' morphostructure of the massif. 1. Lateral sides (1a): Santa Cruz sector and (1b): Presa del Molinilla-Ermita N^o Señora de La Calleja sector; 2. Central sector (Sepúlveda-Puente de Villaseca) and 3. Western edge (Ermita N^o Señora de La Calleja-Presa de Burgomillado). Arrows indicate the position of the geologic cross-sections in Figure 5.

estuvo significativamente condicionado por la particular configuración morfoestructural del mismo.

Este condicionamiento no sólo deriva de la desigual fosilización por el relleno mioceno resultante de ella, sino también de la permanente influencia de la estructura sobre la posición, la dirección e incluso el trazado del cauce a lo largo del proceso de encajamiento, ya que todos los datos llevan a pensar que el trazado meandriforme inicialmente impreso por un fenómeno de epigénesis experimentó con posterioridad impor-

tantes cambios al alcanzar el río los diferentes grupos litoestratigráficos de la serie cretácica y efectuar su actividad excavadora sobre los distintos sectores o componentes de las estructuras plagadas. Por otro lado, aunque resulta difícil precisar si este proceso de encajamiento de las Hoces pudo estar influido por algún tipo de actividad tectónica durante el Cuaternario, las interpretaciones más recientes llegan a la conclusión de que las fallas o cabalgamientos del borde N de este sector del Sistema Central cesaron prácticamente su actividad en la transición Plioceno-Cuaternario (De Vicente

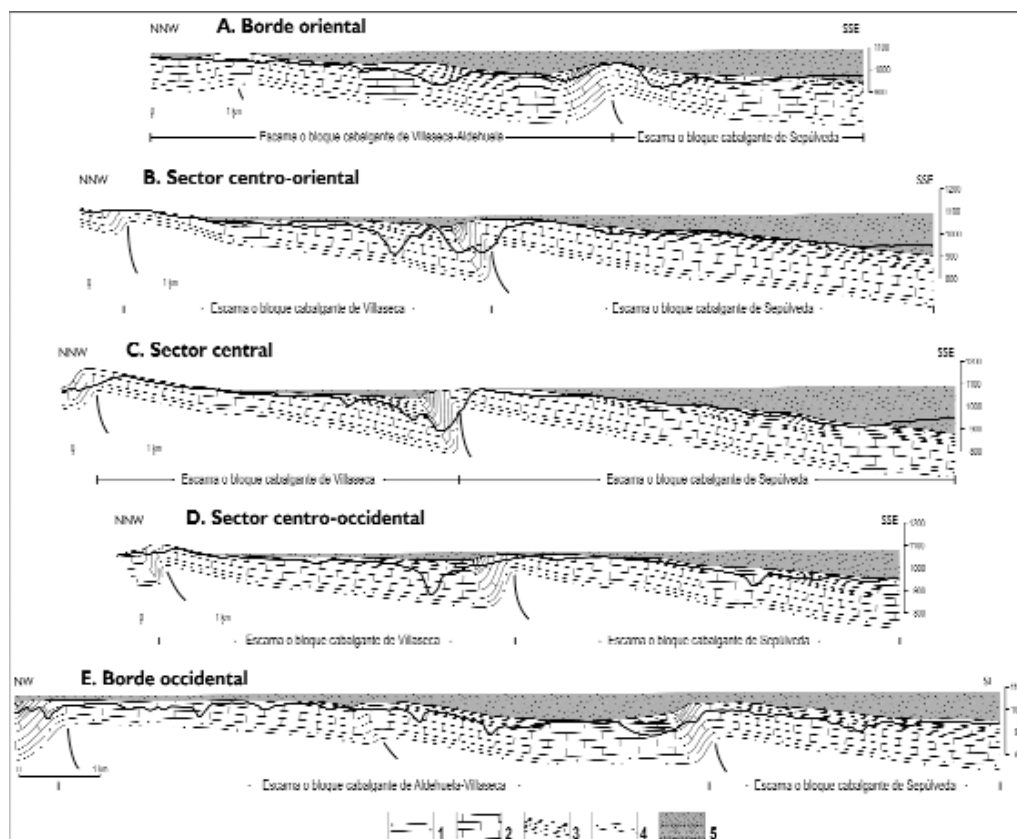


Figura 5. Cortes que muestran el modelo de encajamiento del río Duratón y sus afluentes en el Macizo de Sepúlveda en relación con la superficie de colmatación del relleno detrítico mioceno en cada uno de sus sectores. 1. Complejo morfolitológico arenoso-silíceo del Cretácico Superior; 2. Complejo morfolitológico dolomítico masivo del Cretácico Superior; 3. Complejo morfolitológico dolomítico margoso del Cretácico Superior y unidades conglomeráticas del Oligoceno-Mioceno inferior; 4. Relleno mioceno. [La línea negra gruesa indica la topografía actual. Las tramas por encima de esta línea significan el distinto material erosionado por la excavación fluvial].

Figure 5. Cross-sections showing the entrenchment model of the Duratón River and its tributaries in each sector of the Sepúlveda Massif from the Miocene detritic surface. 1. Upper Cretaceous morpholithologic sand-silica complex; 2. Upper Cretaceous morpholithologic massive dolomite complex; 3. Upper Cretaceous morpholithologic marlitic dolomite complex and Lower Oligocene-Miocene conglomerate units; 4. Miocene infill. (The bold black line indicates present topography. Areas above the line refer to materials eroded by river action).

et al., 1996, 2007; Andeweg et al., 1999; De Bruijne y Andriessen, 2002). En este contexto, aunque no se puede descartar alguna reactivación o reajuste de carácter local (Díez et al., 1996; Barea, 2001; Sánchez Serrano, 2003), parece plausible pensar (salvo que estudios neotectónicos más profundos dentro del ámbito estudiado aporten otras evidencias) que el desarrollo geomorfológico de las Hoces el río Duratón se adaptó a la estructura plegada de Sepúlveda, ya creada en las fases principales de la orogenia alpina.

6. El proceso de encajamiento del río Duratón en el Macizo Sepúlveda y la evolución del trazado meandriforme

La altura relativa de los distintos niveles de acumulación fluvial y su distribución espacial aportan importantes datos para reconstruir la evolución geomorfológica de las Hoces y permite apreciar, en primer lugar, que desde las fases iniciales de encajamiento del río Duratón el modelado del valle estuvo condicionado por la

configuración morfoestructural anticlinorial del Macizo y, como consecuencia de ello, presenta caracteres morfológicos y morfométricos (Tabla 2) sustancialmente diferentes en sus diversos sectores (central, laterales, extremos).

6.1. La evolución de las Hoces en los sectores laterales de la estructura anticlinorial del Macizo de Sepúlveda

En los sectores laterales –tanto oriental como occidental– del ‘anticlinorio’, donde la defor-

mación tectónica es clara pero la elevación estructural de los pliegues es menor y la cobertera cretácica fue fosilizada por un mayor espesor de sedimentos ‘terciarios’ (Fig. 5A y E), los rasgos morfométricos y morfológicos de las Hoces son comunes y se caracterizan por la escasa profundidad del cañón propiamente dicho (entre 30 y 40 m) y por la presencia en las laderas que se desarrollan por encima de él en la margen derecha (al N del Duratón) de una completa serie de niveles de acumulación fluvial (hasta 5 ó 6), los más altos de los cuales se localizan a bastante distancia del cauce actual (superior a los 2 km en algunos casos).

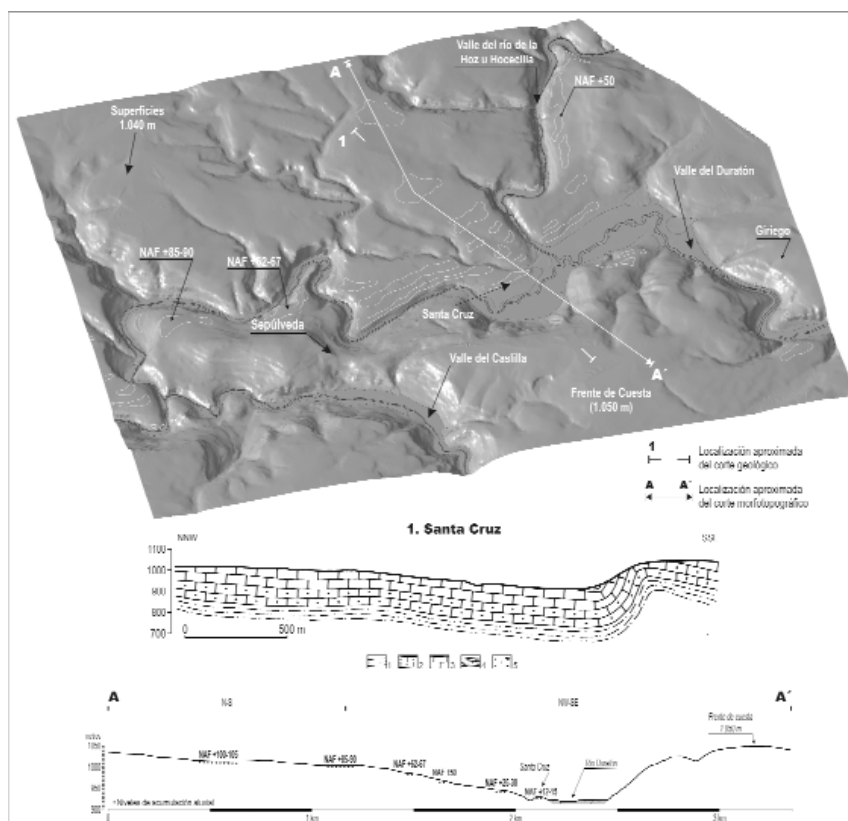


Figura 6. MDT que muestra el encajamiento de las Hoces del Duratón en el sector oriental de la estructura ‘anticlinorial’ del Macizo de Sepúlveda (sector de Santa Cruz), acompañado de un corte geológico idealizado y un perfil morfotopográfico transversal donde se localizan los niveles de acumulación fluvial (NAF). 1. Conglomerados cuarcíticos, areniscas, arcillas, margas, dolomías y arenas y arcillas versicolores del Cretácico Superior; 2. Dolomías y calizas del Cretácico Superior; 3. Dolomías masivas del Cretácico Superior; 4. Dolomías tableadas y margas del Cretácico Superior.

Figure 6. DTM display of the entrenchment of the Duratón Canyon in the eastern sector of the ‘anticlinal’ structure of the Sepúlveda Massif (Santa Cruz sector). Geologic and morph topographic cross sections where fluvial accumulation levels o terraces were located. 1. Conglomerates of quartzite, sandstone, clays, marls, dolomites, sands and clays of the Upper Cretaceous; 2. Upper Cretaceous dolomites and limestones; 3. Massive dolomites of the Upper Cretaceous; 4. Upper Cretaceous laminated dolomite and marls.

Tabla 2. Valores de longitud e índices de sinuosidad del canal del Duratón en los diferentes sectores de las Hoces.
 Table 2. Length values and sinuosity index of the channel of the Duraton River in the different sectors of the Canyon.

	Longitud total del canal	Distancia aérea más corta	Índice de sinuosidad total del canal
Extremo lateral oriental (Giriago-Santa Cruz)	5.524,1	3.787,3	1,46
Sector central (Sepúlveda-Villar de Sobrepeña)	14.532,5	8.519,7	1,71
Extremo lateral occidental (Prensa de La Molinilla)	4.185,5	2.239,4	1,87
Borde occidental (Ermita N. ^a de La Calleja-Ermita de San Frutos-Burgomillodo)	9.416,8	4.737,6	1,99
TOTAL	33.658,9	19.284,0	1,75

En concreto en la ladera del entorno de Santa Cruz en un perfil de algo menos de 2 km aparece una sucesión de hasta 6 niveles (Fig. 6), mientras que en el del tramo de la Presa de la Molinilla-Ermita N^a S^a de la Calleja en poco menos de 1 km se suceden al menos 5 niveles (Fig. 7 y Fig. 8, cortes A y B).

La ubicación precisa de esta secuencia de rellanos recubiertos de depósitos fluviales, separados por pequeñas inflexiones en el suave perfil de las laderas, constituye un fundamento bastante sólido no sólo para interpretar cómo fue la actividad modeladora del Duratón antes y después de alcanzar los estratos carbonáticos más compactos, sino también para apreciar el sentido y el valor del desplazamiento lateral sufrido por el río en estos sectores antes de encajarse definitivamente en las capas dolomíticas masivas. Parece claro, pues, que en estos sectores la divagación del curso fluvial se mantuvo en alguna medida al alcanzar en su proceso de incisión los tramos superiores de la serie cretácica y, teniendo en cuenta la disposición de los rellanos escalonados, la migración o desplazamiento lateral se produjo siempre en conformidad con el sentido de buzamiento de los estratos: hacia el SE en el sector de Santa Cruz y hacia el SW en el de la Presa de La Molinilla. Ello ha posibilitado que la red autóctona que drena hacia estos tramos presente un mayor desarrollo longitudinal y haya podido evolucionar hasta desembocar en el nivel de base impuesto por el río Duratón, sin quedar colgada sobre él (Tanarro, 2006, Tanarro et al., 2008).

6.2. La evolución de las Hoces en el extremo occidental del Macizo de Sepúlveda

En este sector la elevación estructural del Macizo de Sepúlveda se reduce, presentando un suave declive hacia el W y el SW hasta que las capas dolomíticas cretácicas desaparecen recubiertas hoy por materiales terciarios y por arenas cuaternarias de origen eólico. Teniendo en cuenta la menor altura de las charnelas de la flexión, puede interpretarse que al final del Mioceno estuvieron recubiertas aquí por un apreciable espesor de sedimentos detríticos.

El río Duratón, tras describir un 'codo' bien marcado, adopta en este sector occidental del Macizo una trayectoria general SSE-NNW, que mantiene hasta el final de las Hoces en la presa de Burgomillodo. Abandona, por lo tanto, el trazado conforme a la dirección de las estructuras tectónicas que tenía en los tramos anteriores, para circular cortándolas perpendicularmente en sentido contrario al buzamiento de las capas dolomíticas. Dado que este buzamiento es hacia el S, puede decirse que el curso fluvial fluye desde el dorso hacia el frente de un monoclinial, excavando a lo largo de unos 9 km de longitud un cañón profundo, cuyas paredes registran un progresivo incremento de la altura aguas abajo, desde los 70 m hasta los 90-100 m. Junto con ello el rasgo más espectacular es el desarrollo de un trazado sumamente sinuoso: la relación entre la longitud total del canal y la distancia aérea más corta entre los extremos del

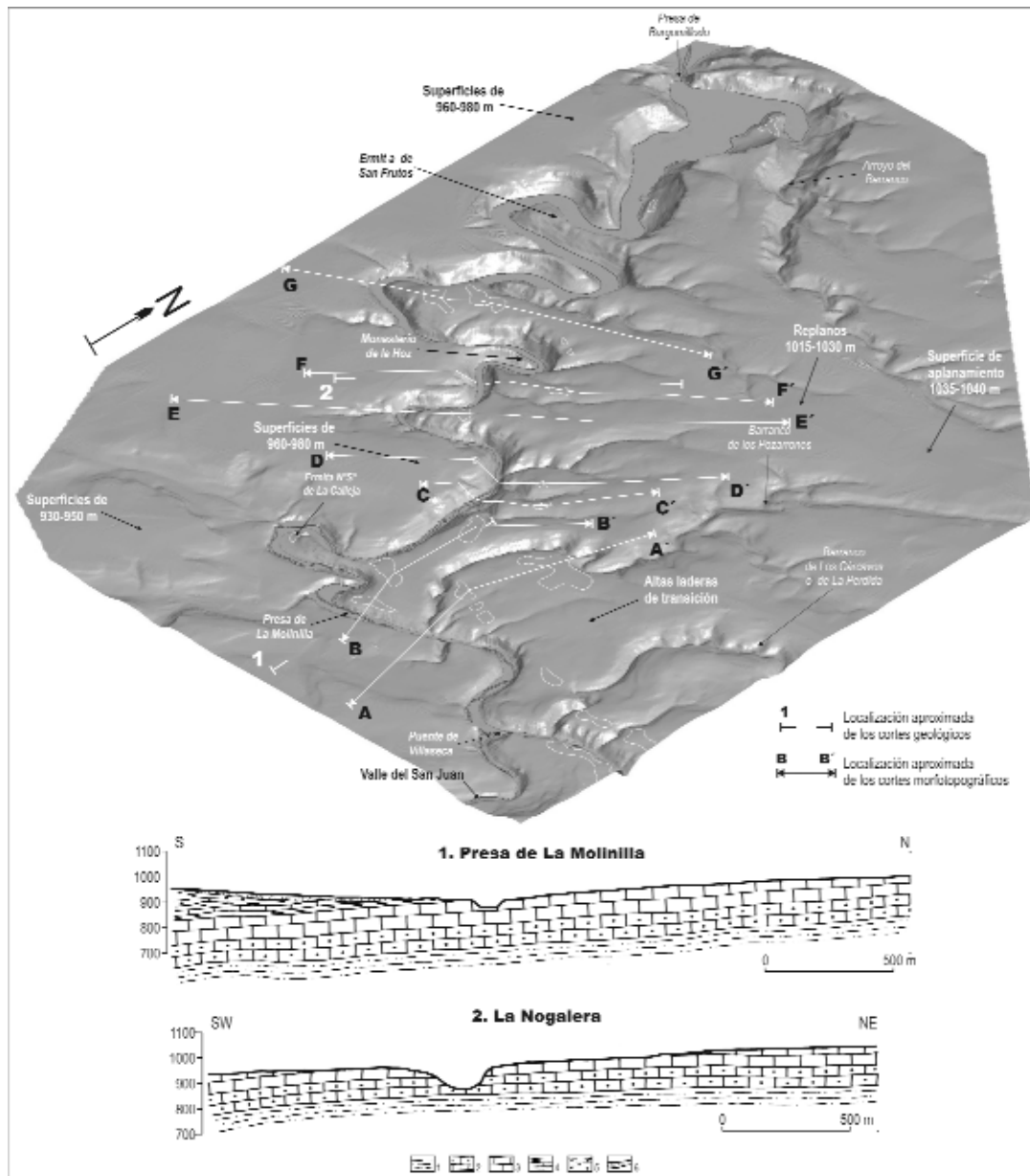


Figura 7. MDT que muestra el encajamiento de las Hoces del Duratón en el sector occidental de la estructura 'anticlinal' del Macizo de Sepúlveda (sector de la Presa de la Molinilla) y en el borde occidental de la misma (sector de la Presa de Burgomillodo), en el que se localizan los distintos niveles de acumulación fluvial (NAF), y cortes geológicos representativos del contexto litoestructural. 1. Conglomerados cuarcíticos, areniscas, arcillas, margas, dolomías y arenas y arcillas versicolores del Cretácico Superior; 2. Dolomías y calizas del Cretácico Superior; 3. Dolomías masivas del Cretácico Superior; 4. Dolomías tableadas y margas del Cretácico Superior; 5. Conglomerados calcáreos y arcillas rojas del Eoceno-Oligoceno; 6. Arenas eólicas cuaternarias.

Figure 7. DTM showing the entrenchment of the Duratón Canyon in the western sector of the 'anticlinal' structure of the Sepúlveda Massif (Presa de la Molinilla sector) and the western edge of the structure (Presa de Burgomillodo sector), where fluvial accumulation levels were located. Geologic cross sections of the lithologic structure. 1. Conglomerates of quartzite, sandstone, clays, marls, dolomites, sands and clays of the Upper Cretaceous; 2. Upper Cretaceous dolomites and limestones; 3. Massive dolomites of the Upper Cretaceous; 4. Upper Cretaceous laminated dolomite and marls; 5. Calcareous conglomerates and red clays from the Eocene-Oligocene; 6. Quaternary aeolian sands.

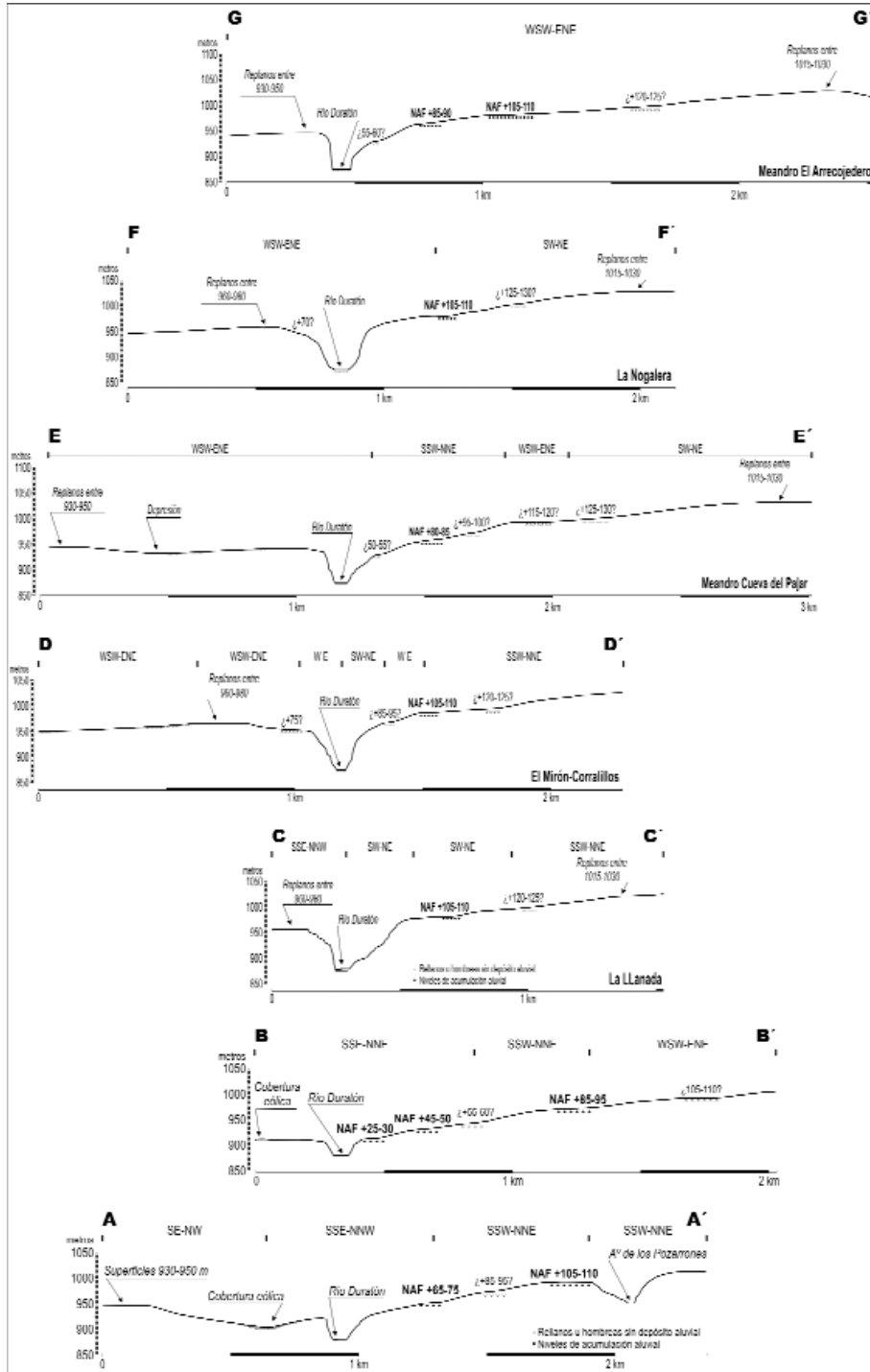


Figura 8. Perfiles morfotopográficos transversales que muestran la localización y el escalonamiento altitudinal de los NAF en el extremo occidental (sector de la Presa de la Molinilla) y el borde occidental (sector de la Presa de Burgomillodo) de las Hoces del Duratón.

Figure 8. Morphotopographic cross sections showing the location of the fluvial accumulation levels in the west (Presa de la Molinilla sector) and on the western edge (Presa de Burgomillodo sector) of the Duratón Canyon.

mismo (Leopold y Wolman, 1957, Morisawa, 1985) es de 1,99 (Tabla 2). En conjunto, salvo un pequeño trecho rectilíneo próximo al cambio de dirección, el cañón actual es en este tramo final una sucesión de meandros muy encajados, algunos de los cuales muestran una gran elongación, apareciendo sus márgenes internas como estrechas penínsulas de longitud superior al kilómetro.

Como se ha señalado, al producirse en él la inmersión lateral de las escamas y la disminución de la altura de las flexiones de la cobertera cretácica, este sector occidental del Macizo de Sepúlveda fue ampliamente fosilizado por los sedimentos 'terciarios' (Fig. 5E). Sobre ellos el Duratón pudo establecerse y circular libremente hasta alcanzar, en un típico proceso de epigénesis, las duras capas cretácicas e imprimir sobre ellas el trazado de su lecho. En principio, todo parece indicar que el patrón meandriforme desarrollado en el recubrimiento detrítico quedó fijado al comenzar a excavar el río las series dolomíticas, predominando después la incisión vertical. Sin embargo, la localización y cartografía en este sector de rellanos cubiertos por depósitos fluviales (Fig. 7 y Fig. 8, cortes C a G), correspondientes casi todos a los NAF de +85-95 m y +105-110 m, permite apreciar que los meandros siguieron evolucionando después de iniciarse el encajamiento de las Hoces, al menos en las fases iniciales del mismo. Todos los retazos aluviales reconocidos en este sector se conservan en la margen derecha (nororiental) del valle, colgados en la parte alta de las laderas o acogidos en la cara interna de los meandros, lo cual pone de manifiesto un ligero desplazamiento inicial del lecho hacia el W y SW, conforme por tanto al sentido del buzamiento de los estratos dolomíticos, y un mantenimiento posterior de la dinámica de dichos meandros.

En definitiva, la incisión vertical en este sector de las Hoces estuvo también acompañada por el crecimiento o extensión lateral de los meandros, que, según las observaciones geomorfológicas efectuadas, se produjo tanto a favor como en contra del buzamiento de los estratos dolomíticos, aunque tuvo un desarrollo mayor en el primer caso. Por su parte, la elevada y creciente profundidad del cañón se explica por el simple hecho del que el río excava una estructura que paulatinamente se levanta en sentido del flujo, de modo que ésta aumenta a

medida que el río se acerca al frente del monoclinial (o al eje de la flexión). Dicha profundidad se acrecienta, además, allí donde la extensión lateral del meandro se desarrolla en sentido opuesto al buzamiento de las capas. Además, este crecimiento propicia la captura de buena parte de los barrancos o torrentes afluentes, los cuales quedan colgados a distintas alturas (Díez Herrero et al., 1996, Tanarro et al., 2008).

6.3. La evolución de las Hoces en el sector central de la estructura anticlinorial del Macizo de Sepúlveda

Desde el punto de vista tectónico este sector corresponde al área que registró una mayor elevación estructural: dentro de su ámbito el cabalgamiento se manifiesta en la cobertera cretácico-paleógena por medio de una franja muy fuertemente plegada cuyo componente fundamental es una flexión o pliegue en rodilla cuyo eje se puede seguir con claridad a lo largo de más de 15 km. En dicha flexión, donde las charnelas anticlinal y sinclinal separadas por un corto y verticalizado flanco Norte se hallan muy próximas entre sí, los flancos meridionales son extensos y muestran un suave buzamiento, en torno a los 10° (Fig. 5B, C y D). En este marco estructural del tramo más elevado y fuertemente deformado del semidomo, el río Duratón, –a lo largo de unos 10 km en línea recta, desde aproximadamente la localidad de Sepúlveda hasta su confluencia con el río San Juan– ha excavado un valle subsecuente (conforme a la dirección de las capas cretácicas) que se caracteriza por su elevada profundidad, entre 70 y 100 m, y por la presencia de meandros encajados que muestran un índice de sinuosidad de 1,71 (Tabla 2). Dada la proximidad al eje del citado pliegue en rodilla, este trazado meandriforme ha implicado que la margen cóncava o externa de algunos de los meandros haya llegado a excavar el eje e incluso a dismantelar parcialmente su flanco Norte, alcanzando así y haciendo aflorar los materiales 'arenoso-silíceos' de la base de la serie del Cretácico, e incluso puntualmente los materiales metamórficos del zócalo. Esta destrucción prácticamente total de la charnela anticlinal del pliegue en rodilla de Sepúlveda ha

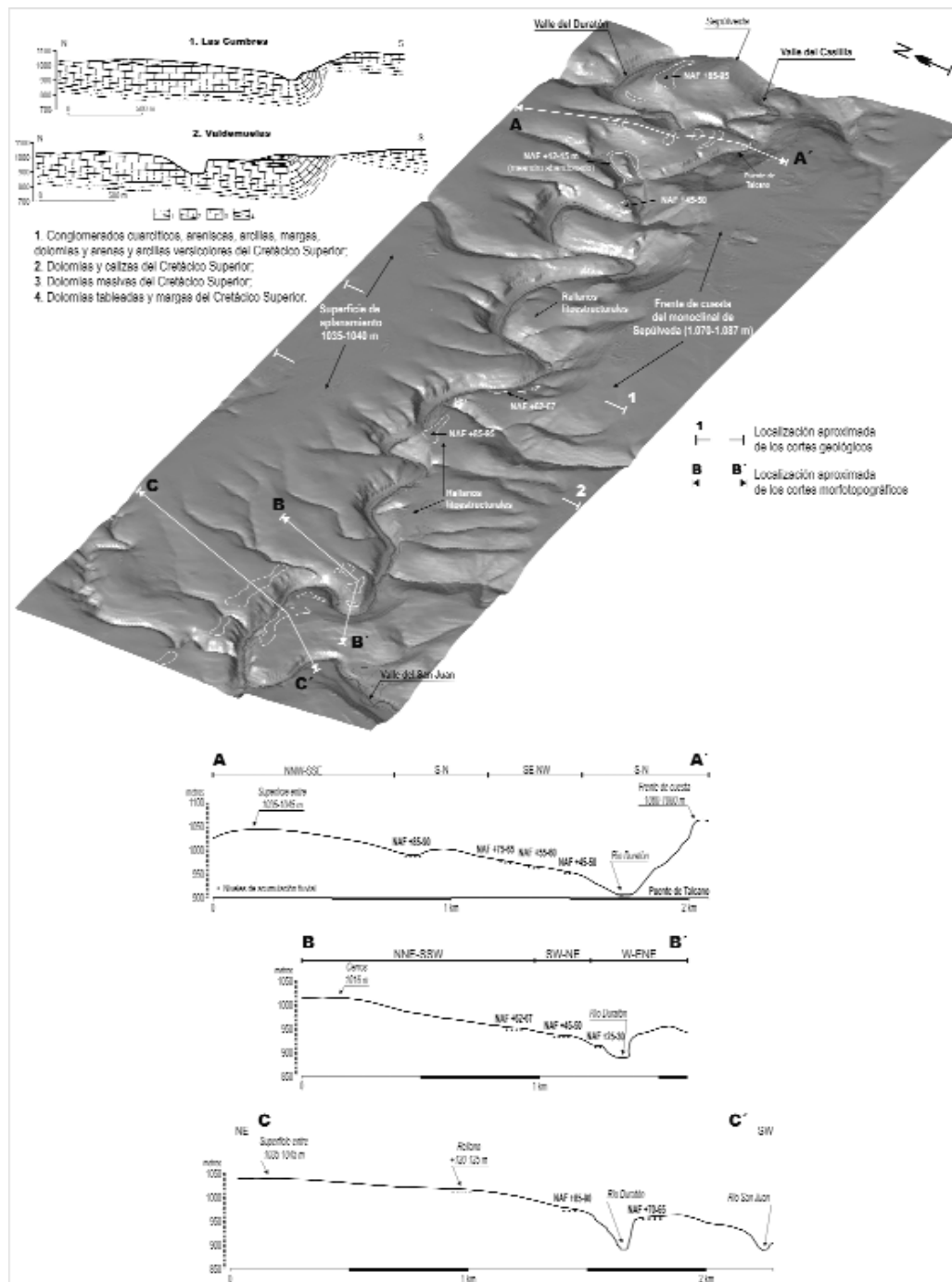


Figura 9. MDT que muestra el encajamiento de las Hoces del Duratón en el sector central de la estructura 'anticlinal' del Macizo de Sepúlveda (Sepúlveda-Puente de Villaseca) y la localización de los diferentes niveles de acumulación fluvial. Cortes geológicos representativos del contexto litoestructural y perfiles morfotopográficos con la localización y el escalonamiento altitudinal de los NAF.

Figure 9. DTM showing entrenchment of the Duratón Canyon in the central sector of the 'anticlinal' structure of the Sepúlveda Massif (Sepúlveda-Puente de Villaseca sector) and the location of the fluvial accumulation levels. Geologic cross sections of the lithologic context and morph topographic cross sections indicate the emplacement of the fluvial accumulation levels.

resaltado el aspecto de cuesta de su flanco meridional, por delante del cual aparecen en forma de estrechos crestones o barras rocosas (*hogbacks*) los restos del flanco septentrional. Este modelado, que se conserva cuando los meandros se alejan del eje de la flexión e inciden enteramente en el borde Sur del dorso del monoclinial situado más al Norte, enlaza a través de un corto talud regularizado, desarrollado sobre la alternancia de dolomías y margas, que a modo de estrechas franjas aplanadas cuya extensión oscila entre los 80 y los 150 m, coronan las laderas interiores de este tramo de las Hoces, especialmente en su margen izquierda (Fig. 9).

Estas franjas aplanadas, que en trabajos anteriores se han interpretado como restos del 'paleocauce' o 'paleovalle' rectilíneo a partir del cual se encajó el cañón, se modelan de forma prácticamente sistemática en el contacto de los bancos superiores de dolomías y margas y el potente 'paquete' constituido por la serie de dolomías masivas infrayacentes. Además, este tipo de 'rellanos litoestructurales' no es exclusivo de las Hoces del Duratón, ya que aparecen en todas las hoces del Macizo de Sepúlveda siempre y cuando los ríos excaven ambos complejos morfológicos (Tanarro, 2006). No obstante, la presencia testimonial y ocasional de un nivel de acumulación fluvial en el borde de dos de ellos (ambos situados a +85-95 m) puede interpretarse como testimonio de episodios de estabilización local de los cursos y aluvionamiento al comenzar a excavar el sustrato más duro de las dolomías masivas. En todo caso, teniendo en cuenta que se ha reconocido una secuencia de 10 niveles de acumulación fluvial y que alguno de ellos se ubica incluso a una cota más alta que la máxima altura de estos rellanos, resulta difícil seguir interpretándolos como fragmentos de un único y amplio fondo de valle a partir del que evolucionó la hoz actual.

Conforme a las observaciones llevadas a cabo para realizar el mapa geomorfológico, puede afirmarse que la existencia de este patrón meandriforme encajado en el tramo de las Hoces correspondiente al sector central del Macizo de Sepúlveda responde a un encajamiento inicial por superposición que estuvo posteriormente controlado y modificado por la configuración estructural de dicho sector. El mayor levantamiento experi-

mentado en él por la estructura plegada hizo que ésta fuera recubierta por un espesor menor de sedimentos detríticos 'terciarios', como consecuencia de lo cual el curso inicial del Duratón, al atravesar éstos y encajarse rápidamente sobre el roquedo dolomítico-margoso del techo de la serie cretácica, tendría aún un trazado poco sinuoso, como se deduce de la posición de los retazos de los niveles aluviales más altos (+105-110 m). Y la disposición en planta de los rellanos correspondientes a los niveles de acumulación fluvial inmediatamente más bajos (+85-95 m, +65-75 m, +45-55 m y +25-30 m), que en su práctica totalidad se encuentran en la margen derecha del valle, pone de manifiesto que, con posterioridad a este inicial encajamiento, las incurvaciones del curso fluvial siguieron evolucionando hasta adquirir su forma típica de meandros.

La observación de la sección transversal de éstos muestra unas diferencias significativas entre ellos, sistemáticamente relacionadas con la disposición tectónica de los estratos en que se desarrollan: la margen interna o convexa de los meandros modelados a favor del buzamiento de los estratos dolomíticos (incurvados hacia el Sur) se caracteriza generalmente por presentar una ladera que se inclina con relativa suavidad o de manera escalonada a través de pequeños escarpes hacia el fondo y por tener en planta una morfología estrecha y 'puntiaguda' (que se traduce en un menor radio de curvatura); por el contrario, la cara interna o convexa de los meandros modelados en contra del buzamiento de las rocas dolomíticas (incurvados hacia el Norte) presentan como elemento fundamental un rellano destacado de origen litoestructural, que enlaza bruscamente con el fondo a través de una ladera corta y escarpada de fuerte pendiente, y su morfología en planta es más abierta (lo que se manifiesta en un mayor radio de curvatura).

De otro lado, los distintos niveles de acumulación fluvial escalonados se localizan preferentemente en la margen interna de los meandros desarrollados en conformidad con el buzamiento de la estructura tectónica, en los cuales se reconocen entre uno y tres niveles. Estos niveles aterrizados se relacionan con episodios en los que el curso de agua deja de incidir y mantiene un fondo estable, seguidos por fases en que se registra

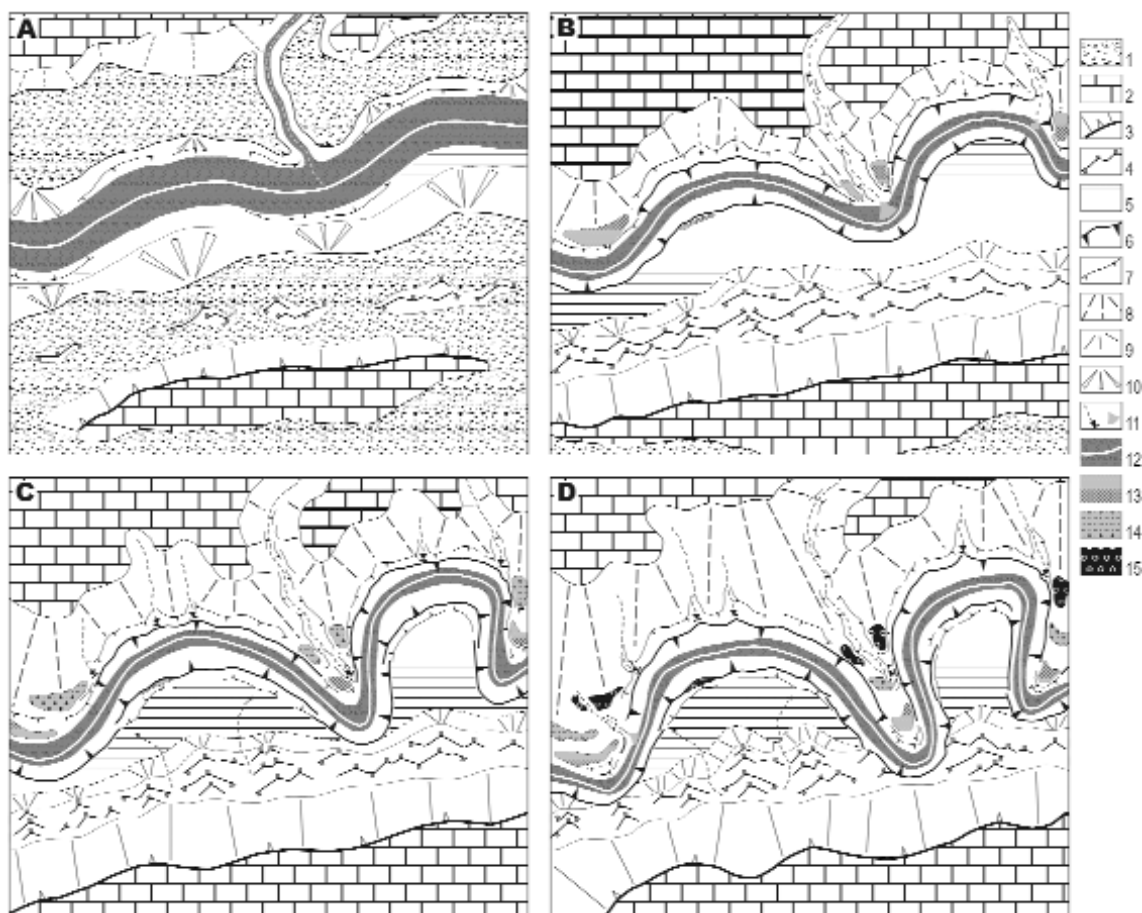


Figura 10. Esquema geomorfológico evolutivo en que se interpretan las etapas del crecimiento de los meandros en el tramo de las Hoces paralelo al pliegue en rodilla de Sepúlveda. Leyenda: 1. Superficies detríticas miocenas; 2. Dorsos de cuesta sobre dolomías masivas; 3. Frente y talud de cuesta; 4. Crestas o barras verticales; 5. Rellanos litoestructurales sobre dolomías masivas; 6. Escarpes principales; 7. Escalones rocosos o escarpes secundarios; 8. Laderas suaves asociadas a la degradación de los dorsos de cuesta por el encajamiento de la red fluvial; 9. Taludes de gravedad; 10. Glacis detríticos suaves; 11. Barrancos colgados y/o conos de deyección; 12. Fondo y lecho del río; 13. Niveles de acumulación fluvial (NAF) bajos; 14. NAF medios; 15. NAF altos.

Figure 10. Schematic representation of the geomorphologic development of meanders in the section of the canyon parallel to the Sepúlveda overfold. **Key:** 1. Miocene detritic materials; 2. Cuesta gentle dip slope over massive dolomites; 3. Cuesta escarpment; 4. Hogbacks; 5. Litho-structural flat surface over massive dolomites; 6. Major scarps; 7. Rocky steps or secondary scarps; 8. Gentle slopes associated with the degradation of the cuesta resulting from river system incision; 9. Talus slope; 10. Gentle detrital glacis; 11. Hanging gorges and/or debris cones; 12. Bottom and riverbed; 13. Lower fluvial accumulation levels; Middle fluvial accumulation levels; 15. Upper fluvial accumulation levels.

un doble proceso de encajamiento y crecimiento de los meandros hacia su margen cóncava. Como se ha podido apreciar en numerosos lugares, la presencia de niveles sucesivos de terrazas fluviales en la cara interna (*slip-off terraces*) indica de forma inequívoca que se trata de ‘meandros en

crecimiento’ (*ingrown meanders*) y permite apreciar el sentido y el valor de la incurvación y el desplazamiento del lecho (Tarr, 1924; Thornbury, 1954; Blank, 1970; Shumm, 1977; Harden, 1990; Harvey, 2007). En este caso, la ubicación de los niveles de terraza de la margen interna de los

meandros permite afirmar que éstos acusaron un mayor desarrollo y crecimiento en el sentido del buzamiento de los estratos dolomíticos (hacia el Sur), es decir hacia el eje de la flexión de Sepúlveda.

A partir de estas evidencias se puede interpretar que el trazado meandriforme de este tramo de las Hoces del Duratón se debe al desigual y contrastado crecimiento de los meandros en una y otra margen a lo largo del proceso de encajamiento del río, que estuvo controlado y dirigido por la configuración estructural: una vez establecido el primer 'paleocauce' en las rocas dolomíticas el río Duratón a medida que fue encajándose acusaba además un mayor desplazamiento lateral de su cauce hacia el Sur, esto es a favor del buzamiento de las series dolomíticas, mientras que por el contrario, éste apenas migro hacia el norte, es decir en sentido contrario al buzamiento, predominando desde el primer paleocauce la incisión y erosión vertical (Fig. 10). En suma, el control estructural de la estructura plegada de Sepúlveda supuso que los meandros básicamente evolucionaran (o lo hicieran de una forma notablemente más rápida) en el sentido del buzamiento de los estratos dolomíticos, cuya expresión morfológica en algunos de ellos fue el desarrollo de meandros de escaso radio de curvatura al ser cada vez más estrechos y 'apuntados', mientras que en el sentido contrario a la inclinación de la estructura tectónica, este crecimiento lateral estuvo muy limitado o ausente.

Conclusiones

Las acumulaciones fluviales colgadas a diferentes alturas que (agrupadas en un total de 10 niveles) se han localizado y analizado en las Hoces del Duratón ponen de manifiesto la existencia de numerosos paleocauces o antiguos fondos cuyo desnivel sobre el lecho actual va desde los 105-110 m hasta los +3-5 m. De ello se deduce que el proceso de encajamiento de este singular valle fue complejo y no consistió en una permanente excavación a partir de un único paleocauce inicial, sino que en él alternaron fases favorables a la incisión y episodios propicios a la estabilización y a la acumulación aluvial, relacionados con las fluctuaciones climáticas del Cuaternario, en

consonancia con los diferentes niveles de base impuestos por el río Duero. La localización y la plasmación cartográfica de toda esta serie de enclaves fluviales dentro del conjunto de la morfoestructura del Macizo de Sepúlveda aportan importantes datos para interpretar las fases iniciales del encajamiento del río, así como para reconstruir los cambios del trazado que experimentó el curso de agua cuando ya incidía en el roquedo dolomítico de dicho Macizo.

El establecimiento inicial del Duratón en este roquedo, con un trazado notablemente sinuoso adquirido sobre los sedimentos detríticos neógenos subyacentes, constituye sin duda un proceso de sobreimposición o epigénesis, pero el posterior proceso de encajamiento no interrumpió el desarrollo del trazado meandriforme, el cual estuvo fuertemente condicionado por la desigual adaptación del río a la configuración morfoestructural anticlinorial del Macizo. En este condicionamiento o control estructural intervinieron fundamentalmente las direcciones de los pliegues, el buzamiento de las capas en sus extensos flancos monoclinales, el salto o levantamiento tectónico de la flexión (máximo en el tramo central y progresivamente menor hacia los extremos) y el espesor de los sedimentos neógenos que en cada sector lo recubrieron.

Puede decirse, en resumen, que en los sectores estructuralmente más levantados y, por tanto, fosilizados con menor espesor de sedimentos detríticos, la incisión del río alcanzó enseguida los materiales dolomíticos comenzando el proceso de encajamiento sin que se produjera después un desplazamiento global del cauce; sin embargo, sí se produjo en ellos un crecimiento de los meandros, que es marcado en los incurvados hacia el Sur, sentido en el que buzan los estratos, y muy limitado en los incurvados hacia el Norte, en contra de la disposición estructural. Por su parte, en los sectores de menor elevación estructural correspondientes a los extremos del Macizo, que fueron recubiertos por un mayor volumen de formaciones detríticas neógenas, el cauce –antes de encajarse en los materiales dolomíticos más duros y compactos– registró un moderado desplazamiento lateral conforme a la pendiente tectónica (hacia el SW en el extremo occidental y hacia el SE en el oriental) y el río mantuvo una dinámica favorable al

desarrollo de meandros de trazado más homogéneo.

Los condicionamientos estructurales que se han podido apreciar son de carácter pasivo, ya que derivan de la disposición tectónica adquirida por los materiales cretácicos antes del comienzo del modelado del valle y se han hecho efectivos, si las interpretaciones vigentes son correctas, en condiciones de aparente calma tectónica. Dichos condicionamientos se relacionan con la adaptación y evolución del río Duratón y su red de afluentes a la particular configuración morfoestructural del macizo de Sepúlveda, en especial a la disposición o buzamiento de los dorsos del conjunto anticlinorial. En todo caso, si, en contra de lo que mantienen las interpretaciones geodinámicas más recientes, el levantamiento del Macizo de Sepúlveda se hubiese reactivado en relación con una posible neotectónica cuaternaria, sincrónica en mayor o menor medida con la excavación de las Hoces del Duratón, la evolución geomorfológica de éstas habría tenido el mismo sentido y caracteres análogos a los indicados y habría incluido, de modo aún más acelerado, el desarrollo y crecimiento de los meandros en conformidad con la pendiente estructural.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto PR1/08-15769 de la Universidad Complutense de Madrid. Asimismo los autores desean agradecer los comentarios y sugerencias de los Drs. A. Díez Herrero y J. F. Martín Duque que han contribuido a mejorar el manuscrito original. De igual modo, agradecemos de manera especial el apoyo brindado por las autoridades y guardas del Parque Natural 'Hoces del río Duratón' (Red Espacios Naturales de Castilla y León).

Referencias bibliográficas

Alonso, A. (1981): El cretácico de la provincia de Segovia (borde norte del Sistema Central). *Seminarios de Estratigrafía*, 7: 271 págs.
 Alonso, A.; Floquet, M.; Meléndez, A. y Salomón, J. (1982): 7. Cameros-Castilla. En: *El Cretácico de España* (Floquet, M.; Alonso, A. y Meléndez, A., Eds). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 345-456 pp.

Andeweg, B.; De Vicente, G.; Cloetingh, S.; Giner, J. y Muñoz Martín, A. (1999): Local stress fields and intraplate deformation of Iberia: variations in spatial and temporal interplay of regional stress sources. *Tectonophysics*, 305: 153-164.
 Babín Vich, R. y Gómez Ortiz, D. (1997): La tectónica alpina en el Borde Norte del Sistema Central Español y su enlace con la Cuenca del Duero. *Estudios Geol.*, 53: 221-228.
 Barea, J. (2001): *Geomorfología y evolución paleoclimática durante el Cuaternario a partir del estudio de los macizos kársticos de los bordes del Sistema Central y de Valporquero* (León). Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 267 págs.
 Blank, H. (1970). Incised meanders in Mason County, Texas. *Geological Society of America Bulletin*, 81: 3135-3140
 Bravard, I. (1965): Notes morphologiques sur la Tierra de Pinares (province de Segovie, Espagne). *Revue de Géographie Alpine*, 53(2): 245-264 (Trad. por Martínez de Pisón, E. 1966. Notas morfológicas sobre la Tierra de Pinares Segoviana. *Estudios Geográficos*, XXVII (102): 107-124).
 Bullon Mata, T.; Lopez Acevedo, V. y Rodríguez Vidal, J. (1978): Consideraciones sobre el karst del cañón del Duratón (Segovia). *Bol. R. Soc. Española Hist. Nat. (Geol.)*, 76: 19-29.
 Cadavid, S.; Corral, A. y Portero, J.M^a. (1971): Investigación estructural y geofísica en la región de Sepúlveda (Segovia). *Bol. R. Soc. Española Hist. Nat. (Geol.)*, 60: 145-173.
 Calonge Cano, G. y Díez Herrero, A. (2002): Páramos, valles y arenales al sur del Duero y Hoces del Duratón (Valladolid-Segovia). *Geomorfología y Paisaje. Guía de excursiones. VII Reunión Nacional de Geomorfología*. Sociedad Española de Geomorfología. Dpto. de Geografía. Universidad de Valladolid, Valladolid, 13-55 pp.
 Capote, R.; De Vicente, G. y González Casado, J.M. (1990): Evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central Español (S.C.E.). *Geogaceta*, 7: 20-22.
 Cascos Maraña, C. (1991): *La Serrezuela de Pradales. Estudio Geomorfológico*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid. 606 págs.
 De Bruijne, C.H. y Andriessen, P.A.M. (2002): Far fields effects of Alpine plate tectonism in the Iberian microplate recorded by fault-related denudation in the Spanish Central System. *Tectonophysics*, 349(1-4): 161-184.
 De Vicente, G.; Giner, J.L.; Muñoz Martín, A.; González-Casado, J.M. y Lindo, R. (1996): Determination of present-day stress tensor and neotectonic interval in the Spanish Central System and Madrid Basin, central Spain. *Tectonophysics*, 266: 405-424.
 De Vicente, G.; Vegas, R.; Muñoz Martín, A.; Silva, P.G.; Andriessen, P.; Cloetingh, S.; González Casado, J.M.; Van Wees, J.D.; Álvarez, J.; Carbó, A. y Olaiz, A. (2007). Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System. *Global and Planetary Change*, 58: 335-381
 Díez Herrero, A.; Pedraza Gilsanz, J. y Sánchez Vaquero, J. (1996): *Fisiografía y paisaje de las Hoces del Río Duratón*. Guía para una excursión de Historia Natural por el cañón

- meridional del río Duratón. XII Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural, 54 págs.
- Díez Herrero, A. y Martín Duque, J.F. (2005): *Las raíces del paisaje: condicionantes geológicos del territorio de Segovia*. Junta de Castilla y León, Valladolid, 461 págs.
- Díez Herrero, A.; Benito, G.; Porat, N. y Gutiérrez-Pérez, I. (2005): Upper Pleistocene palaeofloods in the Duraton river gorge (Central Spain). *Sixth International Conference on Geomorphology. Abstracts*. Zaragoza.
- Eraso, A.; Graiño, S.; Alonso, F.; Bullón, T.; García, R.; López-Acevedo, V.; Santos, V.; Torres, T.; Pedraza, J., Morell, H.; Castello, R. y Mora, J. (1980): Estudio del karst del Cañón del Duratón (Segovia). *Kobie*, 10: 53-127.
- Fernández Fernández, A. (1996): Geomorfología del cañón del río Júcar en la comarca de La Manchuela (Albacete). Tesis Doctoral. Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid, 721 pp.
- Fernández García, P. (1988): *Geomorfología del sector comprendido entre el Sistema Central y el Macizo de Santa María La Real de Nieva (Segovia)*. Tesis Doctoral. Dpto. de Geodinámica Externa. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 336 pp.
- Garzón, M.G.; Pedraza, J. y Ubanell, A.G. (1982): Los modelos evolutivos del relieve del Sistema Central Ibérico (sectores de Gredos y Guadarrama). *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, XXVI(2): 475-496
- Gil, J.; Carenas, B.; Segura, M.; García Hidalgo, J.F. y García, A. (2004): Revisión y correlación de las unidades litoestratigráficas del Cretácico Superior en la región central y oriental de España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 17(3-4), 249-266.
- Gil, J.; García-Hidalgo, J.F.; Segura, M.; Carenas, B.; García, A.; Temiño, J.; y Díaz de Nera, A. (2008). Arquitectura estratigráfica de alta frecuencia de una secuencia de 3^{er} orden en el margen costero de la Cuenca Ibérica (Provincia de Segovia, España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Secc. Geol.*, 102(1-4): 15-33.
- Gómez Ortiz, D. y Babín Vich, R. (1998): Geometría de las fallas inversas de la zona de Sepúlveda (borde norte del Sistema Central) a partir de modelos de pliegues de propagación de falla. *Geogaceta*, 23: 67-70.
- González Amuchastegui, M. J. (1993): Geomorfología del "Alto Tajo" en el sector de Molina de Aragón. Tesis Doctoral, Vol. 1 y 2. Dpto. de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid, 698 pp.
- Harden, D. R. (1990). Controlling factors in the distribution and development of incised meanders in the central Colorado Plateau, *Geological Society of America Bulletin*, 102: 233-242.
- Harvey, A. M. (2007). High sinuosity bedrock channels response to rapid incision: examples in SE Spain. *Rev. C. & G.*, 21 (3-4), 21-47
- Hernández Pacheco, F. (1932): Las terrazas cuaternarias del Duero en su tramo medio. *Bol. R. Soc. Española Hist. Nat. (Geol.)*, 32: 479-487.
- ITGE (1997): *Peñaflor, Hoja 374 (18-15)*. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. ITGE, Madrid.
- ITGE (1993a): Sepúlveda, Hoja 431 (19-17). Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Fecha de realización de la hoja 1993, ITGE, Madrid, (inédito).
- ITGE (1993b): Cantalejo, Hoja 430 (18-17). Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Fecha de realización de la hoja 1993, ITGE, Madrid, (inédito).
- Leopold, L.B. y Wolman, M.G. (1957): Rivers channel patterns: braided, meandering and straight. *US Geol. Survey Prof. Paper*, 282-B.
- Morisawa, M. (1985): *Rivers. Form and process*. Longman, New Cork. 222 pp.
- Muñoz Jiménez, J. y Palacios Estremera, D. (1990): Significado geomorfológico de una red de canales meandriformes impresa en las altiplanicies de la Alcarria, Mesa de Ocaña y la Mancha nororiental. *Eria*, 22: 97-120.
- Muñoz Jiménez, J. y Tanarro García, L.M. (2002): El modelado fluvial en el piedemonte norte del Guadarrama oriental y Somosierra (Sistema Central Español): los valles disimétricos de la alta cuenca del Duratón. En: *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio* (Pérez González, A.; Vegas, J. y Machado, M. J., Eds). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, serie: Geología, 1: 85-95 pp.
- Pedraza Gilsanz, J. (1994): Los modelos genéticos-evolutivos del Sistema Central Español: Implicaciones morfotectónicas. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 19: 91-118.
- Sánchez Serrano, F. (2003) *Análisis de la topografía y deformaciones recientes en el centro de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid.
- Shumm, S.A. (1977): *The fluvial system*. John Wiley & Sons, New York. 338 pp.
- Tanarro, L.M. (2002): Cartografía geomorfológica de las Hoces del río Duratón (borde suroriental de la cuenca del Duero, provincia de Segovia) a escala 1: 10.000. En: *Estudios Recientes (2000-2002) en geomorfología, patrimonio, montaña y dinámica territorial* (Serrano, E, García De Celis, A; Guerra, J. C., Morales C.G & Ortega M.T. Eds). Sociedad Española de Geomorfología, Dpto. de Geografía. Universidad de Valladolid. Valladolid. 285-299 pp.
- Tanarro, L.M. (2006). *Geomorfología de los valles del piedemonte Norte del Sistema Central en su sector segoviano: cuenca del río Duratón*. Colección Tesis Doctorales Digitales. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. ISBN: 978-84-669-2988-2.
- Tanarro, L. M.; Díez-Herrero, A. y Llorente, M. (2008). Origen y significado evolutivo de los torrentes afluentes colgados del cañón del Duratón (Segovia). En J. Benavente y F.J. Gracia, eds). *Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008* (X Reunión Nacional de Geomorfología), SEG, Cádiz, pp. 223-226.
- Tarr, W.A. (1924): Intrenched and incised meanders of some streams on the northern slope of the Ozark Plateau in Missouri. *The Journal of Geology*, 32(7): 583-600.
- Thornbury, W.D. (1954). *Principles of Geomorphology*. Wiley, New York. 618 pp.