
**XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica
25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.**

Técnicas SIG aplicadas al estudio del relieve de los Montes de León (NO de la Península Ibérica)

A. Mínguez-Menéndez ^{a*}, E. García-Meléndez ^b, S. Martín-Alfageme ^c, Á. Martín-Serrano ^d, A. Rodríguez-García ^b

^a *IGME, Área de Cartografía Geocientífica. Parque Científico*

^b *Universidad de León, Área de Geodinámica Externa.*

^c *IGME, Área de Investigación en Cambio Global*

^d *IGME, Área de Cartografía Geocientífica.*

Resumen

En este trabajo se presenta un método basado en el análisis de modelos digitales de elevación (MDE) a través de SIG, encaminado a realizar una cartografía preliminar de antiguas superficies de aplanamiento en los relieves que bordean la cuenca del Bierzo (oeste de la provincia de León, noroeste de la Península Ibérica).

El área de estudio es un complejo sistema escalonado de niveles de aplanamiento elaborados sobre el basamento del Macizo Ibérico, constituyente de los relieves montañosos de la zona, deformado por la Orogenia Alpina durante el Cenozoico, en donde las superficies se encuentran elevadas, basculadas, fragmentadas y muy degradadas.

Partiendo del MDE con paso de malla de 25 m del PNOA se realizó una caracterización general de la zona de estudio mediante la obtención de mapas derivados: pendientes, orientaciones de pendiente y sombreado, así como de la red de drenaje. Empleando la extensión *EZ Profile* para ArcGIS 9.3 se generaron 213 perfiles topográficos, sobre los principales cordales e interfluvios, con los que se localizaron y correlacionaron los elementos culminantes (indicios y restos de superficies de aplanamiento) presentes en toda la zona de estudio, lo que permitió reconstruir el relieve previo al desmantelamiento por parte de la red de drenaje.

* *E-mail:* aidaminguez@gmail.com.

Una vez delimitadas las superficies de aplanamiento se procedió a su caracterización, agrupación y jerarquización, mediante el estudio de superficies de tendencia, el análisis de la red de drenaje y la relación con la actividad tectónica. Se realizó una reconstrucción teórica de cada uno de los aplanamientos a través de la interpolación de los puntos pertenecientes al antiguo relieve, generando así una superficie de tendencia de primer orden, de donde se obtuvo la orientación y pendiente de cada una de ellas. A su vez, se buscaron anomalías en los cauces de los ríos que atraviesan los aplanamientos, que pudieran indicar actividad tectónica reciente. Asimismo, se llevó a cabo un estudio de las cuencas de drenaje, sobre las que se realizaron cálculos de hipsometría y de asimetría (Factor de Asimetría). Por último, se calculó la incisión del drenaje sobre las superficies de aplanamiento cartografiadas.

Como resultado se obtuvieron veinte superficies clasificadas en ocho niveles, desde los 1000m a los 2100m, en donde se observa cómo los distintos elementos de un mismo nivel se encuentran en extremos opuestos de la zona de estudio, ubicados en forma de orla perdiendo altura hacia la cuenca del Bierzo.

Palabras clave: MED; geomorfología; superficies de aplanamiento; perfiles topográficos; superficies de tendencia; hipsometría.

1. Introducción

La finalidad de este trabajo es determinar cómo ha evolucionado el relieve condicionado por los procesos geológicos internos y externos en una amplia zona del noroeste de la Península Ibérica, que abarca relieves importantes tanto en la terminación occidental de la Cordillera Cantábrica, como en los Montes de León y en la depresión del Bierzo.

Para ello se realizó un análisis de varios Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de donde se extrajeron mapas derivados que fueron empleados en la definición y caracterización geomorfológica del relieve de la zona a escala 1:200.000. Posteriormente se llevó a cabo la cartografía y caracterización de superficies culminantes de aplanamiento a partir de perfiles topográficos, determinando la relación entre ellas y los elementos que los articulan, lo que dio lugar a la interpretación de la evolución geomorfológica en esta zona. Asimismo, la localización de anomalías en perfiles longitudinales de ríos, así como el estudio de las cuencas de drenaje resultaron muy útiles a la hora de agrupar y jerarquizar dichas superficies.

1.1. Zona de estudio

El área de estudio se encuentra situada en el NO de la Península Ibérica, ocupando principalmente la provincia de León, extendiéndose hasta las provincias limítrofes de Asturias, Lugo, Orense y Zamora, ocupando una extensión de más de 10.000 km² (fig. 1).

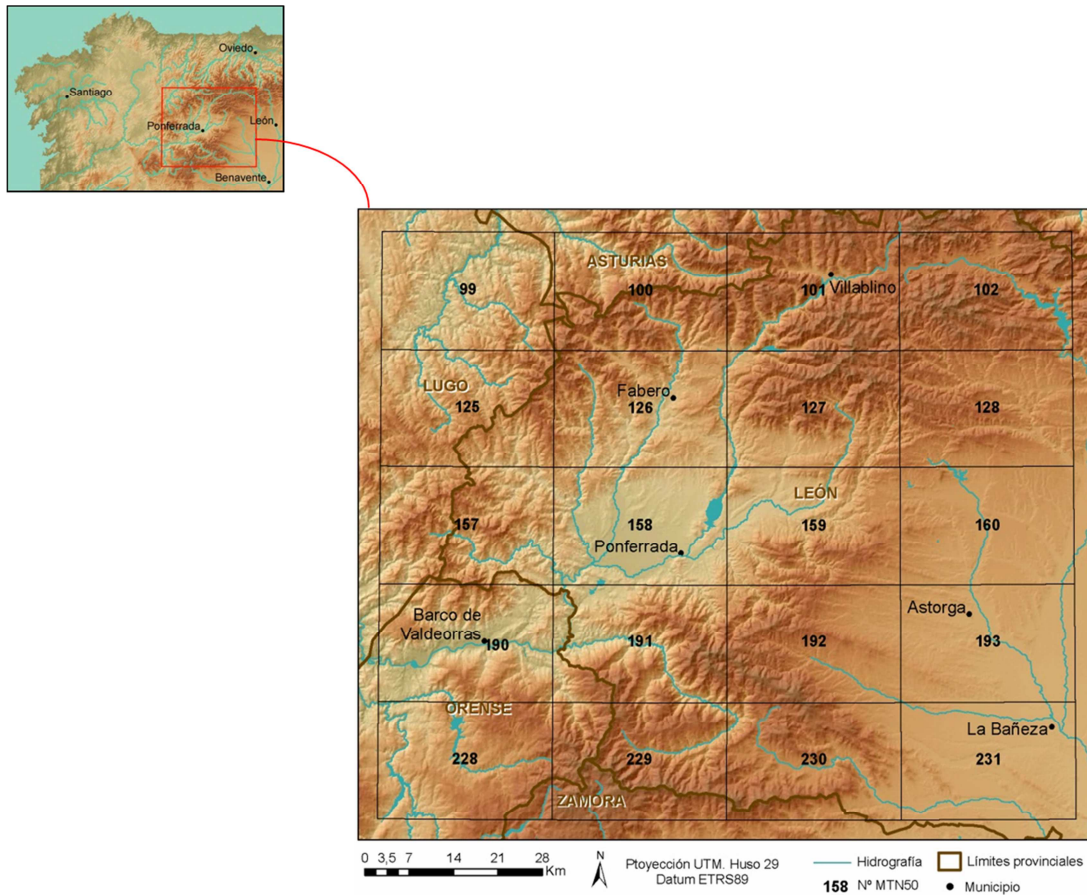


Fig. 1. Localización de la zona de estudio.

Este territorio se engloba en la macroestructura de los Montes de León, producto de una tectónica de bloques desarrollada sobre materiales paleozoicos, perteneciente al Macizo Ibérico, caracterizado por un intenso y continuado proceso de modelado cuyo resultado es una topografía fundamentalmente montañosa en donde las superficies culminantes son elevadas pero aplanadas y de altitud modesta, que en algunos crestones superan los 2000 m de altitud.

2. Material y método

El trabajo parte del análisis minucioso de la zona de estudio que permitió generar un mapa de líneas de cumbres sobre los principales relieves, mediante el análisis de imágenes de satélite, así como de mapas derivados de MDE y del estudio bibliográfico de autores que han estudiado esta zona. Esto fue la base de los perfiles topográficos del terreno que, cruzados con la información altitudinal que aportan los MDE, permitió general el mapa de superficies de aplanamiento. El software empleado en el tratamiento de los MDE ha sido el ArcGIS 10.0.

Los mapas derivados, obtenidos a partir de MDE (MDE 25 m del PNOA y SRTM de 90 m), así como el análisis de la superficie sintética creada por interpolación de valores de altitud, fueron empleados en la caracterización de la zona y, posteriormente, de las superficies cartografiadas. Por último, el análisis de la red de drenaje resultó de gran ayuda para determinar la posible existencia de actividad tectónica reciente en la zona (fig. 2).

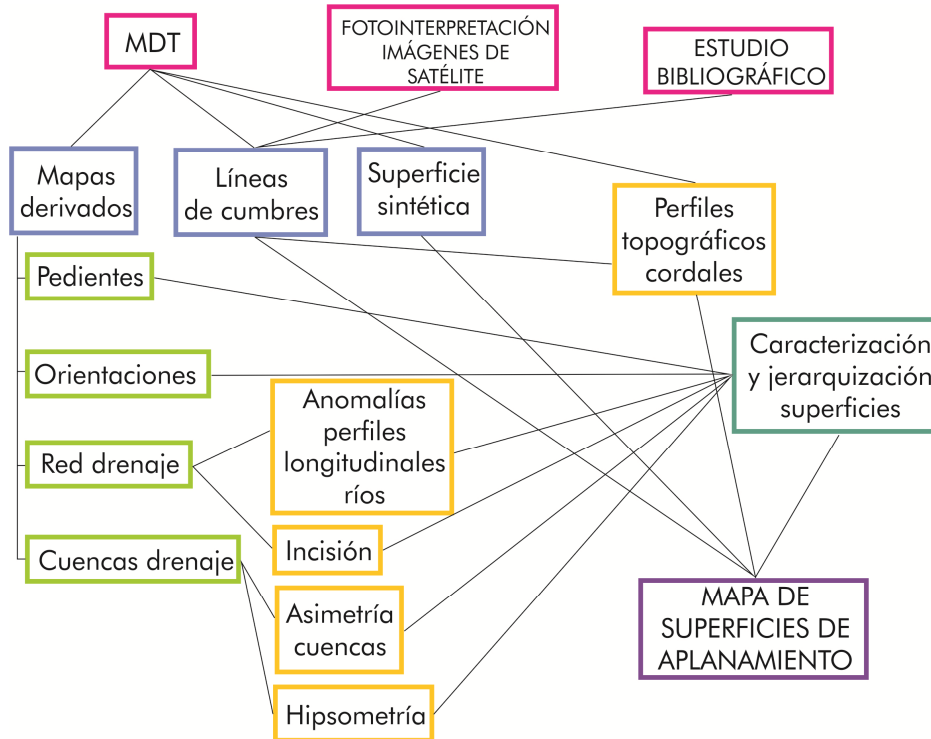


Fig. 2. Esquema del método seguido en este trabajo.

2.1. Mapa de pendientes y de orientación de pendientes

En una superficie *raster*, la pendiente es la tasa de cambio máximo en el valor z desde cada celda. Por su parte, la orientación de la pendiente de un punto se define como el ángulo existente entre el vector que señala al norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de ese punto (Felicísimo, 1994). La orientación de un MDE indica la dirección a la que apunta la pendiente de cada celda, expresada en grados, a partir de la orientación norte, de 0° a 360° (Laurini y Thompson, 1992).

Ambos mapas fueron generados a partir del MDE25 mediante la extensión *Spatial Analyst* de ArcGIS. El mapa de pendientes obtenido resultó muy útil a la hora de identificar áreas de pendiente homogénea, zonas planas o cambios bruscos de inclinación de la superficie topográfica que pudieran identificar límites de áreas a cartografiar relacionadas con las superficies de aplanamiento. Mientras que el mapa de orientación de pendientes fue empleado en la caracterización del área de trabajo y de las superficies de aplanamiento, identificando zonas orientadas hacia la misma dirección.

2.2. Perfiles topográficos y mapa de superficies de aplanamiento

Con el fin de realizar una cartografía de superficies de aplanamiento se ideó un estudio a partir de perfiles topográficos de los principales cordales e interfluvios, con los que pudieran ser localizados y correlacionados los elementos culminantes (restos e indicios de estas superficies) presentes en la zona y así reconstruir el relieve previo al desmantelamiento por parte de la red de drenaje.

Fueron generados a partir del MDE25 mediante el módulo El análisis de los mismos se basó en detectar extensiones llanas, ya fueran horizontales o con cierta pendiente. El *software* de CAD *Microstation V8i* permitió el trazado de tangentes entre las principales elevaciones o áreas planas, pudiéndose medir su ángulo de inclinación frente a la horizontal, en grados. De esta forma se detectaron anomalías en los perfiles, como picos que superaban la línea de cumbres, bruscos o sutiles cambios de pendiente, áreas distantes con la misma tendencia, etc. Los límites de cada superficie fueron definidos a partir de los puntos del relieve que coincidían con las líneas tangentes de los perfiles ubicados en la parte más externa de cada una de dichas superficies.

Una vez delimitadas y cartografiadas las superficies de aplanamiento sobre la base de la interpretación de la correlación entre perfiles se procedió a su caracterización, agrupación y jerarquización. El primer paso fue realizar una reconstrucción teórica de cada una de estas superficies mediante el empleo de superficies de tendencia (Sánchez Serrano, 2000). Para la obtención de las superficies de tendencia se utilizó el método de interpolación *Trend* de primer orden, de donde pudo calcularse la pendiente y la orientación de cada una.

2.3. Red de drenaje

El estudio de la red de drenaje es fundamental para detectar anomalías, tanto en los patrones de drenaje que desarrolla, como en los perfiles longitudinales de cada cauce. Un análisis de estas características morfológicas puede ayudar a detectar los cambios de pendiente, a lineaciones y basculamientos del terreno en la zona de estudio.

La generación del mapa de la red de drenaje se basó en tres elementos: (i) un mapa de dirección de flujo, (ii) un mapa de acumulación de flujo y (iii) el tamaño mínimo del área vertiente que define la pertenencia o no de un píxel a la red de drenaje (Tarboton *et al.*, 1991).

2.4. Superficie sintética del terreno

Tomando como base los valores de altitud del MDE SRTM se realizó un estudio semiautomático mediante interpolación matemática que permitió generar una “bóveda” hipotética previa a la erosión fluvial, de los relieves de la zona de estudio. Para ello, sobre un mapa de curvas de nivel con equidistancia de 100 m, se tomaron puntos en los lugares susceptibles de formar parte de una superficie aplanada inicial, sin tener en cuenta la erosión producida en los valles por los cauces fluviales, es decir, en las zonas exteriores de los macizos montañosos. Se tomaron un total de 665 puntos en toda la zona, en diecisiete alturas, desde 500 m a 2100 m, cada 100 m.

El método de interpolación elegido para generar la superficie continua fue el algoritmo *Natural Neighbor*, ubicado en el grupo de herramientas *Spatial Analyst* de ArcGIS, el cual no da como resultado valores de altitud fuera del rango de los datos de entrada, produce superficies suavizadas, por lo que resulta más apropiado para casos en los que los datos de partida son dispersos y su disposición es irregular (Boissonnant y Cazals, 2000).

2.5. Factor de asimetría de cuencas

La inclinación producida por la tectónica, tanto a nivel local como regional puede ser detectada por la forma de la cuenca de drenaje vista en planta. El factor de asimetría (FA) (Hare y Gardner, 1985) se define como la proporción de área de cuenca situada a la derecha del cauce con respecto al área total de la cuenca. De acuerdo con Pérez-Peña *et al.* (2010), se realiza una clasificación de los valores de asimetría de cuencas según el siguiente índice:

$$FA^* = |50 - 100 \cdot Ad/At| \quad (1)$$

donde Ad es el área de la cuenca a la derecha del cauce y At es el área total de la cuenca. Los valores de FA* por debajo de 5 definen cuencas simétricas, los valores entre 5 y 10 determinan cuencas ligeramente asimétricas, los valores entre 10 y 15 representan cuencas moderadamente asimétricas y los valores por encima de 15 indican cuencas fuertemente asimétricas.

2.6. Hipsometría

La hipsometría es una medida que representa la relación existente entre la elevación y el área de una cuenca de drenaje, un cauce o una captura fluvial (Langbein, 1947; Strahler, 1952). Mediante su estudio se obtiene una visión clara de la distribución del área de distintas secciones horizontales de una superficie con respecto a su altitud. Este parámetro está fuertemente ligado a la disección de la cuenca y a su madurez erosiva. A través del análisis de la hipsometría se obtienen la curva hipsométrica (CH) donde están representados, de forma acumulativa, los valores normalizados de área frente a los de altitud, y el índice hipsométrico (IH), a través del que se cuantifica dicho parámetro.

El área bajo la HC es denominada como integral hipsométrica y es equivalente al índice IH. El cálculo del IH es sencillo mediante la siguiente fórmula:

$$IH = (E_{media} - E_{mín}) / (E_{máx} - E_{mín}) \quad (2)$$

donde E_{media} es la elevación media de esa franja de terreno, E_{máx} corresponde a su elevación máxima y E_{mín} a su elevación mínima.

Willgoose y Hancock (1998) establecieron una clasificación en la que valores superiores a 0,50 de IH dominarían los procesos de ladera (madurez), cuencas con valores inferiores a 0,50 dominaría la erosión fluvial (juventud) y las cuencas con valores próximos a 0,50 se encontrarían en equilibrio.

2.7. Incisión

Otra forma de analizar la evolución del relieve es mediante el cálculo de la incisión por parte de la red de drenaje. Para ello se estimó el encajamiento de la red fluvial con respecto a las superficies teóricas cartografiadas (apartado 2.2). La cota de la red fluvial se calculó a partir del MDE25 y el dato de la altura de cada superficie se obtuvo mediante el análisis de las superficies de tendencia. Con ello se generó una red de drenaje con el valor de la diferencia de estas dos cotas en cada píxel.

3. Resultados

El trabajo de cartografía realizado dio como resultado un mapa de superficies de aplanamiento en el que aparecen representadas veinte unidades, clasificadas en ocho niveles en torno a 2100 m, 1900 m, 1800 m, 1600 m, 1500 m, 1300 m, 1100 m y 1000 m (fig. 3). Las determinadas como culminantes se encuentran en los extremos norte y sur-sureste, encontrándose a una altitud media que ronda los 2000-2100 con pendientes muy bajas. La excepción se encuentra en la superficie de Ancares 1, que sería considerada como superficie culminante a pesar de estar ubicada una altitud máxima de unos 1900 m.

Descendiendo se encuentra una serie de superficies con altitudes en torno a los 1800 m próximas a los aplanamientos culminantes de las sierras de Vizbuena en el norte y la Cabrera en el sur, de pequeño tamaño y presentan una baja inclinación, excepto la de mayor extensión que desciende hacia la cuenca del Duero hasta altitudes de 1400 m.

El siguiente escalón está representado por cinco superficies que se encuentran en torno a los 1500 m, aunque con inclinaciones y desniveles amplios. Se encuentran geográficamente más próximas al centro de la cuenca del Bierzo con relación a las superficies culminantes. Una de ellas actúa como separación entre las cuencas del Bierzo y del Duero.

A continuación, muy por debajo de las anteriormente, están tres superficies a unos 1100 m, en una posición media entre las sierras y la cuenca terciaria. Por último, se delimitaron dos superficies a unos 1000 m, que supone las superficies de aplanamiento situadas a menor altitud, ubicadas en la zona central del área de estudio, en el noroeste y sureste respectivamente, actuando como bordes de la cuenca del Bierzo.

Tabla 1. Características de cada una de las superficies cartografiadas, calculadas a partir del MDE25 y los mapas derivados del mismo.

Superficie	Área (km ²)	Altitud media (m)	Pendiente (°)	Orientación
Ancares 1	151,11	1873	1,03	S
Ancares 2	52,1	1476	0,62	S
Sil 1	110,58	976	0,55	O
Sil 2	176,02	1021	0,96	SE
Caurel 1	153,4	1500	0,26	SE
Segundera1	336,96	1388	1,37	O
Sanabria 1	211,54	1634	1,19	S
Aquilianos1	57,16	1498	0,14	O
Aquilianos 2	12,59	1798	0,7	NO
Cabrera 1	346,8	1968	1,11	SE
Cabrera 2	196,09	1605	0,25	SO
Cabrera 3	31,9	1258	2,48	SE
Montes 1	753,01	1316	0,54	NE
Montes 2	17,32	1097	0,69	NO
Montes 3	15,29	988	1,25	O
Vizbueno 1	71,31	1981	0,32	NO
Vizbueno 2	11,36	1789	0,66	S
Vizbueno 3	289,79	1557	1,36	E
Luna 1	18,35	2060	0,38	E
Omaña 1	177,58	1127	0,96	SE

El análisis de asimetría de cuencas revela que en el sector NE, de las tres cuencas que nacen en lo alto de la sierra, dos de ellas presentan alta asimetría y una media-alta. En el sector NO dos tienen asimetría media-alta, dos media-baja y una se encuentra en equilibrio. Mientras que en el sector SE existe una cuenca con asimetría media-alta, otra con asimetría media-baja y dos de ellas en equilibrio.

Del análisis hipsométrico (fig. 3) se desprende que la mayoría de las cuencas estudiadas se encuentra en un estado de evolución maduro. Las cinco cuencas del sector NO presentan valores similares de IH, todos ellos en torno a 0,4, considerándose como perteneciente a un estado de madurez intermedio. En el sector NE es donde existen mayores diferencias entre las cuencas, los tres ríos cuyas cabeceras se ubican en el cordal principal presentan, de oeste a este, un aumento de la convexidad en sus CH, así como un aumento en sus valores de IH. En el sector SE también existen notables diferencias en la hipsometría de sus cuencas, de forma general se puede decir que, de oeste a este, estos ríos presentan un aumento en la convexidad de las curvas hipsométricas, al igual que ocurre con los valores de IH.

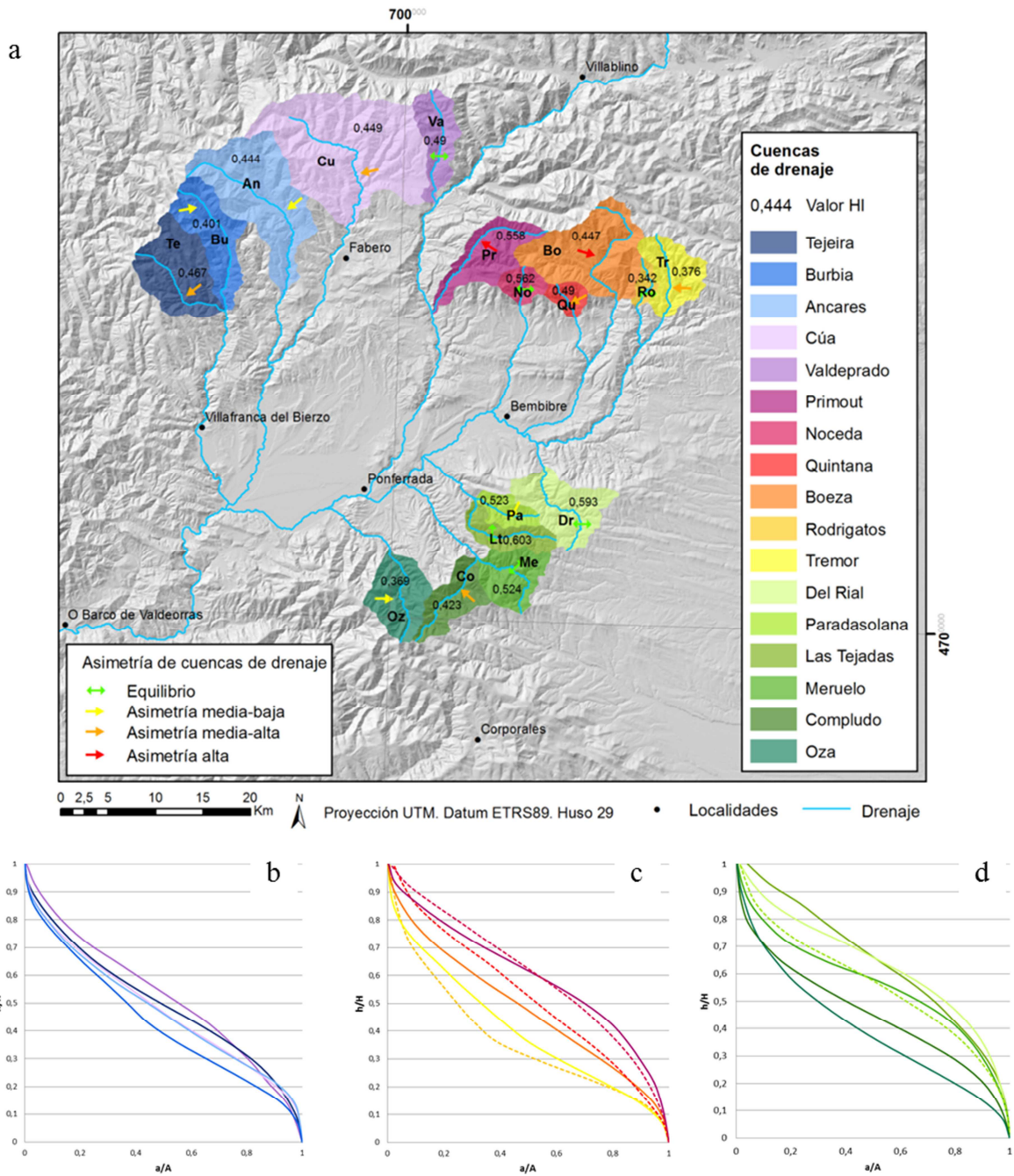


Fig. 3 (a) localización de las cuencas de drenaje sobre las que se ha calculado la curva hipsométrica, el índice hipsométrico y la asimetría. Aparece representado mediante flechas el valor de asimetría del cauce respecto a la cuenca por la que discurre, y el índice IH. (b) representación de las curvas hipsométricas de los ríos del sector NO de la cuenca de estudio. (c) curvas hipsométricas del sector SE del área de estudio. (d) curvas hipsométricas de las cuencas del sector NE.

4. Discusión y conclusiones

El empleo de las técnicas de SIG descritas en este trabajo ha permitido la delimitación de una serie de superficies de erosión de una forma sintética, no realizada hasta ahora en la zona de estudio.

El método empleado para la delimitación de superficies de aplanamiento a partir de perfiles topográficos de cordales resultó de gran utilidad, permitiendo realizar una reconstrucción a partir de los restos existentes de estas superficies.

La superficie inicial sería el resultado de la actuación durante un largo periodo de tiempo de los procesos erosivos ocurridos tras la Orogenia Hercínica, que durante el Mesozoico y, coincidiendo con un largo periodo de estabilidad, permitirían la elaboración de esta superficie en el Macizo Ibérico. Posteriormente, durante la Orogenia Alpina, esta superficie inicial quedaría dislocada en distintos niveles de forma que los más elevados constituirían los extensos arrasamientos que se observan en el Macizo Ibérico, en zonas montañosas, constituyendo la superficie o nivel de cumbres (*gipfel*flur).

La generación de una superficie sintética del terreno a partir de la interpolación de valores de altitud permitió corroborar el trabajo realizado a partir de los perfiles topográficos.

El análisis de la red de drenaje a través de la asimetría de cuencas y de la hipsometría se conforma con una herramienta válida a la hora de detectar posible actividad tectónica reciente que haya estado implicada en la dislocación de la superficie de aplanamiento inicial.

Los valores más elevados de asimetría son los de las cuencas de los ríos Primout y Boeza, la primera de ellas inclinada hacia el oeste y la segunda hacia el este, lo que podría hacer pensar que ha habido un levantamiento en la cabecera de estos ríos, muy próximas entre sí, que haya provocado esta asimetría en sus cauces. Las cuencas de los ríos que nacen en los Montes de León tienen un alto grado de simetría, mientras que en su parte oeste ha podido producirse algún movimiento tectónico entre las cuencas de los ríos Oza y Compludo, adyacentes entre sí, ya que los valores de asimetría indican un acercamiento lateral de dichos cauces.

En cuanto a la hipsometría, revela que el sector NO no ha sufrido movimientos tectónicos recientes que hayan alterado los cursos fluviales de forma significativa. En el sector NE se puede pensar que existe un desplazamiento de la actividad tectónica reciente en esta zona, desde el río Sil hacia el este, incluyendo la cuenca más oriental del sector NO. En el sector SE se observa que de oeste a este aumentan los valores de IH, lo que puede significar que en los Montes de León ha habido actividad tectónica más recientemente que en los Montes Aquilianos.

5. Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto de la Junta de Castilla y León LE311A12-2 y por el proyecto Consolider Ingenio 2006 CSD-2006, TopoIberia Geociencias en Iberia.

Referencias

- Feliciísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Dirección Regional de Recursos Naturales del Principado de Asturias. Oviedo (España). 118 pp.
- Laurini, R. y Thompson, D. (1992). Fundamentals of Spatial Information Systems. Academic Press, 680 pp.
- Sánchez Serrano, F. (2000). Análisis de la Topografía y Deformaciones Recientes en el Centro de la Península Ibérica. Tesis doctoral, Universidad Complutense. Madrid (España). 202 pp.
- Tarboton, D.G.; Bras, R.L. y Rodríguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 5: 81-100.
- Boissonnant, J.D y Cazals, F. (2000). Smooth surfaces reconstruction via natural neighbor interpolation of distance functions. *Unité de recherches INIA Sophia Antipolis*. 28 pp.
- Hare, P.W. y Gardner, T.W. (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. En: *Tectonic Geomorphology*, MORISAWA, M. y HACK, J.T. (Eds.). Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium. Allen and Unwin, Boston, 75-104.
- Pérez-Peña, J.V; Azor, A.; Azañón, J.M. y Keller, E.A. (2010). Active tectonics in Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain) Insights of geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology* 119:74-87. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.020.
- Willgoose, C. y Hancock, G. (1998). Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and processes in transport-limited catchment. *Earth Surf. Process. Landf.* 23: 611-623.