

Geomorfología Regional y Ordenación Integral del Territorio: nuevas perspectivas basadas en la incertidumbre y la complejidad de las formas del terreno. Aplicación en la cuenca del Río Bullaque (Montes de Toledo, España)

Regional Geomorphology and Land-Use Planning: New possibilities for its application based upon uncertainty and complexity of landforms. The example of the Bullaque river basin (Toledo Mountain Range, Spain)

José Muñoz-Rojas¹, Rosa M. Carrasco² y Javier de Pedraza³

1. *Macaulay Land Use Research Institute. Integrated Land-Use Systems Research Group (ILUS).*
Craigiebuckler, Aberdeen. AB15 8QH. Reino Unido. munozmorenes@yahoo.es.

2. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. UCLM. Lab 011. Avda. Carlos III s/n. 45071. Toledo.

3. Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas.
Universidad Complutense de Madrid. Avda. José Antonio Nováis, nº 2. Madrid.

PALABRAS CLAVE: Geomorfología Regional, Ordenación Integral del Territorio, Morfometría fractal, análisis Fuzzy, cuenca del río Bullaque.

KEY WORDS: Regional Geomorphology, Land Use Planning, Fractal morphometrics, Fuzzy analysis, the Bullaque river basin.

RESUMEN

La Geomorfología Regional, definida como ciencia que se ocupa de describir y explicar la distribución espacial de las formas del terreno a escala regional y sub-regional, ha sido considerada por la planificación física y la ordenación del territorio más clásicas, como la única disciplina capaz de analizar las "líneas maestras" que definen el carácter complejo del territorio y del paisaje. La utilización del relieve como base física para la delimitación y definición de unidades territoriales integradas, básicas para gestionar el territorio y sus recursos, ha constituido además uno de los métodos tradicionalmente empleados por algunas de las disciplinas ambientales que en mayor medida han contribuido al acercamiento de la planificación física clásica hacia la nueva ordenación integral; es el caso de la Ecología del Paisaje, la Ecología Humana y la Geografía Ambiental.

Paradójicamente, la importancia de los criterios fisiográficos y geomorfológicos de regionalización en planificación se ha ido reduciendo en la nueva "ordenación integral", quedando relegados a determinados procedimientos de planificación sectorial. Entre los sectores en los que la Geomorfología ha conseguido mantener su peso, destacan la gestión de recursos hídricos, de Espacios Naturales Protegidos, de riesgos naturales e inducidos y del paisaje.

En este sentido, es a partir del reciente auge de una serie de teorías y modelos en planificación territorial asociados al paradigma socio-ambiental, entre los que sobresalen particularmente la complejidad e incertidumbre de los sistemas territoriales, cuando se ha generado una crítica generalizada hacia las ciencias naturales más clásicas que, como la Geomorfología, han sido incapaces de generar propuestas actualizadas. Por ello, la Geomorfología aplicada a la planificación ha sido genéricamente acusada de inmovilista cuando no, incluso, de determinista.

En el presente artículo se analiza la eficacia y posibilidades de implementación de una metodología de análisis geomorfológico regional, con base en los principios de incertidumbre y complejidad de las formas del terreno, que fue ensayada con resultados positivos en la "región-plan" (la cuenca del río Bullaque; Ciudad Real-Toledo).

ABSTRACT

Regional Geomorphology is defined as the scientific study of the spatial distribution of landforms at both regional and sub-regional scales, and has been traditionally considered by land use planners, as the discipline capable to explain the master lines that define the character of both territory and landscape. The use of landforms and land-units to delineate and define territorial units useful for land and resource management is a classical procedure used by both Land-Use and classic Spatial Planning. The design and use of either physiographic (synthetic) or parametric (analytical) landform-based methodologies to define homogeneous regions is a classic procedure, developed and used by sciences such as regional geography, landscape ecology and environmental geomorphology.

Nevertheless, the former importance of the diverse existing regionalization criteria based upon physiographic and geomorphologic features, has recently suffered from a continuous decrease in both their technical and political popularity, being presently reduced almost exclusively to certain sectorial planning procedures. Amongst the territorial components and processes whose planning strategies have managed to retain the importance of landforms and land units specially outstand watersheds, Natural Protected Areas, natural and induced Hazards and Landscape.

One of the main causes explaining the aforementioned decrease might probably lie upon the recent trend that is redirecting Spatial Planning towards a more complex socio-environmental, and each time less land-use-based, discipline. Even if Land-Use Planning still constitutes a very central component of complex modern Spatial Planning, it is no longer considered as its main core. Instead, issues such as the creation of places, public participation and governance-related strategies, and the capacity to link together

the diverse actors, policies, scales and interests involved on sectorial planning in order to attain a sustainable development, have arisen as the main goals to achieve.

In order to adapt to such new tendencies, land-use planning has evolved based upon the newest socio-environmental paradigms, assuming therefore the importance of concepts such as complexity and uncertainty. Even if these changes have taken place mostly from within a theoretical perspective, certain traditional sciences, such as landscape and spatial ecology, earth-system sciences, human and regional geography and applied sociology, have all been able to generate new models that are easily adaptable to the newest planning purposes. Clearly contrasting with the former, some more classic natural sciences, including Geomorphology, have shown a much stronger reticence to adapt to such changes, from both a theoretical and applied point of view.

On the present article, the results of the methodology designed to provide Regional Geomorphology with both the epistemic foundations and practical tools necessary to become a complex science useful to the aforementioned newest tendencies in planning, are discussed. For such purpose certain indicators of complexity and uncertainty in landforms were designed, and discussed, using the theoretical basis provided by broader concepts such as fractal and complex geometries and fuzzy methodologies.

The utility of such indicators and methodologies from within a planning perspective were positively essayed at the Bullaque river basin (Ciudad Real-Toledo), a region characterized by the high diversity and complexity of its landscape and territorial features and values. The results obtained also served to prove the miss-accuracy of the most traditional Regional Geomorphology-based planning methodologies. The possibility to obtain fuzzy indicators of landforms, made it possible, both epistemologically and from an applied perspective, to generate more flexible and less technocratic methodologies for planning in accordance with the present principles implied by the assumption of the socio-environmental paradigm.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. *Objetivos y justificación del trabajo*

El objetivo fundamental de este trabajo es contribuir a mejorar los métodos de análisis geomorfológicos regionales aplicados al diseño de estrategias de planificación física que, en su nueva perspectiva con base holística y de sostenibilidad, ha sido rebautizada como “ordenación integral” (GARCIA ABRIL *et al.*, 2006).

Para ello se aplican metodologías y conceptos novedosos relacionados con la incertidumbre y la complejidad espacial (*fuzzy*, fractales, geomorfometría compleja, caos y complejidad), y se analiza su eficacia mediante la aplicación práctica a la cuenca del río Bullaque; en lo sucesivo “la región-plan”.

Como principio epistemológico de base adoptado para la realización del análisis propuesto, se decidió optar por la moderna perspectiva socio-ambiental que, considerando la complejidad de las relaciones sociedad-medio físico, ha demostrado ser el marco de trabajo más adecuado a la hora de proponer estrategias de planificación territorial capaces de abordar los retos asociados a la nueva ordenación integral (FOLCH, 1999; LÓPEZ RIDAURA *et al.*, 2002).

La adopción de los principios ligados a dicha perspectiva, se justifica por su capacidad para contribuir al diseño de nuevas estrategias útiles para superar los problemas de ineficacia detectados en los métodos tradicionales de planificación física del territorio y del paisaje (GALLENT *et al.*, 2008).

En la actualidad nos encontramos inmersos en un escenario de cambio paulatino, desde el sistema de planificación territorial más tradicional ligado en exclusiva a una planificación física (*Land Use Planning*, en su acepción anglosajona)

hacia un nuevo sistema de planificación integrada (*Spatial Integrated Planning*). El primero se basa en la asignación exclusiva de los usos del suelo considerados “óptimos” mediante diferentes estrategias de zonificación espacial; el segundo en el análisis de complejidad de los sistemas y sub-sistemas territoriales (GALLENT *et al.*, 2008).

Por otra parte, hay que señalar además que existe una situación dialéctica en la función tradicionalmente asignada al medio físico (Geología y Geomorfología incluidas); así: mientras determinadas escuelas de planificación consideran el medio físico como receptor de los efectos de la actividad antrópica (capacidad de acogida), otras, generalmente de carácter marcadamente desarrollista, lo analizan como fuente de recursos naturales (COOKE & DOORNKANP, 1990).

Esta última postura, que ha sido la predominante tradicionalmente, se ha mantenido relativamente inmutable al menos hasta el reciente surgimiento de una cierta conciencia ambiental colectiva (OJEDA, 1999). Actualmente es la primera postura la que ha cobrado mayor relevancia, creciendo la preocupación por el papel del medio físico como receptor de residuos y efectos negativos de la acción antrópica (GÓMEZ OREA, 2002).

Estos cambios llevan implícita la necesidad de adoptar los principios básicos de complejidad e incertidumbre en las metodologías de trabajo de las disciplinas científicas tradicionalmente ligadas a la ordenación del territorio. Esto resulta absolutamente imprescindible si se quiere llegar a comprender el funcionamiento real del sistema territorial y, en consecuencia, incrementar la eficacia de las estrategias de planificación diseñadas (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008).

Ante este reto, hay disciplinas cuya capacidad de adaptación y respuesta al cambio de paradigma ha sido altamente positiva. Es el caso de la Ecología

Regional y del Paisaje (GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, 1981, 1985; FORMAN, 1995), de la Geografía Humana y Regional (HUBBARD *et al.*, 2005; MARSH & GROSSA, 2004), de la Sociología Ambiental (HARPER, 2004), y de las ciencias del sistema Tierra (SKINNER *et al.*, 1999).

Frente a las anteriores, otras disciplinas no han sido capaces de dar una respuesta efectiva ante estos cambios; es el caso de ciencias con base taxonómica, como la Botánica y la Zoología, y otras más bien sistémicas como la Geomorfología y la Geografía Física (GALLENT *et al.*, 2008).

Sin embargo, y desde una perspectiva estrictamente teórica, resulta evidente que existe una relación necesaria entre la Geomorfología y la planificación territorial, que además afecta a todas y cada una de las fases que constituyen la estructura de cualquier trabajo. De hecho, el estudio del relieve tradicionalmente ha sido considerado fundamental para abordar muchos procedimientos utilizados en planificación territorial; buenos ejemplo son los análisis de riesgos naturales, la delimitación y cartografía de ámbitos territorial homogéneos y la definición de unidades de paisaje. Este hecho queda manifiesto en la cantidad y relevancia de trabajos con esa temática que se ha realizado en España y otros países (ver al respecto: HERNÁNDEZ PACHECO, 1934, 1955, 1956; GÓMEZ OREA, 1975, 2000; CENDRERO *et al.*, 1976, 1992; DÍAZ DE TERÁN, 1978; PEDRAZA, 1982, 2000, 2005; MARTÍN-DUQUE, 1997; PEDRAZA *et al.*, 2006).

La preocupación de la Geomorfología por los problemas ambientales complejos y su consecuente integración en el seno de la planificación territorial con base en la sostenibilidad, constituye un proceso relativamente marginal en términos globales. Al menos si se le compara con el rol adquirido por parte de otras ciencias naturales clásicas, entre las que destaca de manera sobresaliente la Ecología (RAMOS, 1979. RAMOS & FERNÁNDEZ-GALIANO, 1995).

La no incorporación del paradigma socio-ambiental con base en los principios de incertidumbre y complejidad, se puede identificar, por tanto, como una de las causas por lo cual determinadas ciencias han ido perdiendo su papel de elemento central en la ordenación territorial; es el caso de la Geomorfología.

Además y debido a la estrecha relación que tradicionalmente ha existido entre la Geomorfología, definida como el estudio de “las líneas maestras del paisaje” (CARRASCO, 1999), y la planificación física, ese cambio que aludimos serviría para reubicar a esta última en la nueva ordenación integrada desde una perspectiva sostenible.

En la esa línea de innovación y revisión metodológica que se ha señalado al principio, otro aspecto a destacar del presente trabajo es la importancia del papel otorgado a las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). En este caso se han intentado superar las restricciones impuestas por la tradicional consideración de las TIG en su condición de mera herramienta. Para ello se ha adoptado la postura que las define más bien como el componente tecnológico de una nueva ciencia territorial holística e integradora (CHUVIECO *et al.*, 2005), y que se encuentra desde sus orígenes directamente relacionada con la planificación (MCHARG, 1969).

Con la asunción del papel central otorgado a las TIG en el contexto de la planificación, se pretende recuperar la importancia de la cuantificación como un procedimiento clave de la ciencia territorial y de la planificación, superando así años de abandono de este campo metodológico debido a la influencia de la ciencia regional de raíz francesa (ORTEGA VALCÁRCEL, 2000).

1.2. Adecuación e interés de la “región-plan” elegida

Las áreas mediterráneas rurales y de montaña media, que es el “taxón territorial” al que pertenece la “región-plan” elegida para este trabajo (la Cuenca del río Bullaque; Fig. 1), se encuentran en una fase de crisis prolongada que ha dado lugar a la progresiva degradación de sus paisajes históricos (GARCÍA NOVO, 2007; PASCUAL, 2007; MARTÍ, 2007).

Por otro lado, la reciente introducción a nivel europeo de una serie de medidas político-legislativas de corte sostenible (ARROYO, 2007), ha determinado la necesidad de diseñar estrategias de planificación territorial dotadas de una mayor dosis de flexibilidad y capacidad de adaptación a los cambios.

Para ello se deben implementar medidas de ordenación integral del territorio, que consideren la acción del hombre como un factor fundamental en la configuración de paisajes valiosos (DÍAZ PINEDA, 2000).

Esto implica necesariamente, considerar el análisis de la incertidumbre y de la complejidad espacial como un procedimiento esencial de diagnóstico de cada uno de los elementos que constituyen el “sistema territorial”, entre los cuales se incluye al relieve y sus formas.

En consecuencia, se puede afirmar que el objeto de análisis del presente artículo no es solo la complejidad de las formas del terreno en tanto permiten vertebrar el territorio, sino también las



Figura 1.—Contextualización geográfica y fisiográfica de la cuenca del río Bullaque, indicada mediante las grandes unidades fisiográficas.

LEYENDA: 1. Poblaciones; 2. Límite entre Comunidades Autónomas; 3. Límite entre provincias; 4. Límite de la cuenca del río Bullaque.

—Geographic and physiographic context of the Bullaque river basin, as indicated by the Land Units.

LÉGENDE: 1. Towns and villages; 2 and 3, borders between Autonomous Communities and between provinces; limit of the Bullaque river basin

características del ámbito de planificación sobre el que se ensaya la metodología.

1.3. Fundamentos de la metodología utilizada

Al igual que ocurre en el resto de ciencias sociales, la dificultad para elaborar leyes generales y científicamente fiables en planificación territorial es inherente a la propia naturaleza imprevisible o aleatoria del comportamiento humano (SMELSER & BALTER, 2001).

El problema de las leyes generales elaboradas a partir del estudio de casos particulares, tampoco ha sido ajeno a determinadas ciencias naturales y de la Tierra que, entre otros, emplean métodos regionales o corológicos; es el caso de la Geomorfología, Biogeografía, Climatología y Edafología (GREGORY, 2000).

Esta dificultad no desaparece, incluso aumenta, en el caso de las nuevas disciplinas socio-

ambientales, que encuentran enormes dificultades al intentar establecer modelos generales que expliquen patrones de relación entre las sociedades humanas (subjetividad) y el medio físico o natural (objetividad) (LÓPEZ RIDAURA *et al.*, 2002).

Por tanto, la posibilidad de aplicar y contrastar un método inductivo para elaborar hipótesis válidas para el conjunto de regiones pertenecientes al taxón territorial en el que se incluye la “región-plan” (cuenca del río Bullaque), resultaba altamente inadecuado.

Intentado paliar los problemas derivados de la ineficiencia de dichos métodos, se optó por aplicar un procedimiento hipotético-deductivo basado en los postulados del “falsacionismo científico” (POPPER, 1934), y que en su versión refinada por LAKATOS (1993), adopta los principios derivados de la Teoría de las Revoluciones Científicas, enunciada por KUHN (1962), y corrige así las deficiencias operativas de la teoría *popperiana* original (SERRES & AUTHIER, 1995).

Para aplicar dicha metodología, en primer lugar se planteó como hipótesis a falsar la idea de que es posible elaborar una metodología de análisis de la incertidumbre y complejidad de las formas del relieve, y que ésta sirve de base para generar una nueva planificación física adaptada a la nueva ordenación integral del territorio.

Dicha hipótesis se contrastó sobre la cuenca del río Bullaque, de manera que si resultaba válida para este caso concreto podría ser considerada, al menos, como “no falsa” para el taxón territorial al que pertenece la “región-plan”; es decir, para los territorios rurales de montaña media mediterránea (MUÑOZ-ROJAS, 2006, 2007; MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2006a, 2006b, 2007, 2008).

2. DESARROLLO METODOLÓGICO

2.1. Delimitación del área de estudio o “región-plan”

Para la delimitación de la región o territorio a planificar, se diseñó una metodología con base en la cuantificación de los errores derivados de no considerar el papel de la incertidumbre y de la complejidad en la delimitación estándar, que es la que ya se había implementado con anterioridad en la “región-plan” elegida (MUÑOZ-ROJAS 2007; MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2006a, 2006b, 2007, 2008).

Por ello dicha metodología se subdividió en dos etapas, que responden a la necesidad de superar los esquemas tradicionales usados en regionalizaciones de corte fisiográfica (MARTÍN-DUQUE, 1997).

2.1.1. Etapa primera: delimitación estándar

En el caso de regiones o territorios “esencialmente homogéneos” (una cuenca hidrográfica es, sin duda, un buen ejemplo), en principio la documentación de partida más idónea es la proporcionada por un Modelo Digital del Terreno (MDT). Frente a lo anterior, en el caso de regiones complejas la documentación de base corresponde a las capas de información, y estas hacen referencia directa al criterio de regionalización concreto elegido para su definición; por ejemplo: información urbana y económica en el caso de regiones funcionales, del medio físico en regiones naturales, de ámbitos político-administrativos en el caso de regiones-plan, etc.

Para el caso concreto de la “región-plan” elegida en este trabajo, que por su condición de cuenca hidrográfica puede considerarse esencialmente homogénea (equivalente a una “región fisiográfica”), el esquema de trabajo diseñado (Fig. 2) consistió en contrastar y afinar a la escala adecuada los resultados obtenidos al aplicar los diferentes algoritmos más habituales, implementados sobre programas comerciales tanto ráster como vectoriales. Posteriormente se contrastaron los resultados con las diferentes delimitaciones oficiales existentes, y con otros indicadores del medio, como la red fluvial.

2.1.2. Etapa segunda: delimitación complementaria

Con el fin de minimizar los posibles errores y desajustes derivados de las metodologías estándar, se propuso el diseño de otra complementaria que, en realidad, es una adaptación a los métodos aplicados en la fase anterior utilizando los principios

de incertidumbre y complejidad de las formas del terreno (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008).

Por tanto, esta segunda fase de la metodología (Fig. 3) debía servir para introducir en el mecanismo de delimitación general la medición de la incertidumbre, que es considerada como el indicador más evidente de la complejidad con que se trabaja al estudiar límites territoriales (GÓMEZ DELGADO & BOSQUE SENDRA, 2004).

Los procesos de regionalización son altamente dinámicos y están determinados por una cierta carga de subjetividad (GÓMEZ MENDOZA, 2002). Por otro lado, hay que indicar que el tipo o criterio de regionalización definido es el que va a marcar el esquema de trabajo y los objetivos a conseguir.

En una regionalización como ésta, que es estrictamente fisiográfica (MARTÍN-DUQUE, 1997; PEDRAZA *et al.*, 2006), son las líneas divisorias de vertiente o los límites entre determinadas formas del terreno (según se trate de cuencas hidrográficas, o de regiones morfográficas o paisajísticas) las que determinan los límites interregionales.

La principal ventaja de este tipo de criterios o procedimientos respecto a los analíticos, es la de contar con instrumentos como la fotogrametría digital que permiten afinar al máximo la calidad esperable de los resultados, reduciendo al mínimo la influencia de la subjetividad (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008).

No obstante, y de acuerdo con los principios establecidos para el presente trabajo, debe intentarse que los límites generados resulten suficientemente flexibles como para reflejar la complejidad e incertidumbre que caracteriza a las formas del

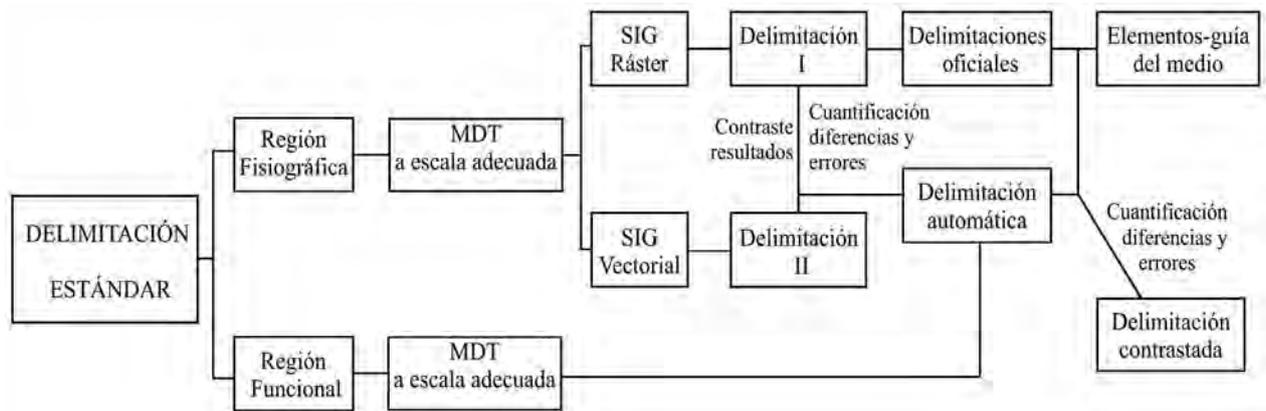


Figura 2.–Metodología aplicada para la delimitación estándar de Unidades Territoriales Integradas (UTI) en regiones fisiográficas y funcionales.

–Methodology for the standard delimitation of Integrated Territorial Units, using both physiographic and functional units.



Figura 3.—Metodología propuesta para minimizar los errores al delimitar Unidades Territoriales Integradas (UTI) de naturaleza fisiográfica, utilizando los datos y procedimientos estándar proporcionados por los organismos oficiales y técnicos.

—Proposed methodology to minimize the errors to delimit Integrated Territorial Units of a physiographic nature, carried out throughout the use of standard dates and procedures provided by several official and technical entities.

terreno reales (ARRELL *et al.*, 2007; SCHMIDT & HEWITT, 2004).

En este sentido, hay que indicar que el diseño de un procedimiento de regionalización o delimitación complementario al procedimiento estandarizado, tenía dos objetivos fundamentales: uno era conseguir una delimitación más precisa que se sustentara en mayor medida que el anterior en la generación de categorías abiertas o flexibles, y otro cuantificar la incertidumbre generada por los mecanismos tradicionales de trabajo.

El primer paso propuesto (Fig. 3) consistió en la utilización de herramientas de fotogrametría digital (entre las herramientas ensayadas en este trabajo están MICRODEM, ARC-SCENE, DIGI-3D y ORMESOFT) para generar un estereo-anaglifo que, con una exageración vertical suficiente, permitiera contrastar y corregir los errores cometidos en la delimitación estándar (Fig. 4).

Posteriormente se diseñaron y calcularon una serie de variables geomorfológicas complejas que, para aquellas zonas más confusas, debían poder ayudar a medir el nivel de incertidumbre con el que se trabaja en los algoritmos y programas más comerciales, mejorando además la precisión en la misma (DAVIS & KELLER, 1997).

Para la generación de estas variables geomorfológicas complejas, existen diversas posibilidades que parten de un MDT sencillo y se ejecutan mediante la programación de los correspondientes algoritmos en lenguajes suficientemente versátiles.

De entre todos los lenguajes de programación disponibles, tanto por su simplicidad como por su idoneidad para el tratamiento de variables espaciales (implementación de algoritmos morfométricos), el que se consideró más adecuado fue Java 1.5 (*J2SE 2 Platform Standard Edition 5.0*).

La aplicación de los algoritmos diseñados debía conducir a la generación de índices de complejidad del relieve, que ayudarían a acercar entre sí los diferentes resultados de la regionalización oficial. Además, facilitarían la cuantificación de los errores cometidos por los diferentes organismos oficiales que producen información fisiográfica (Fig. 4).

El área de cálculo idónea para la estimación de estas variables, tanto en términos de manejabilidad de los archivos como en lo que respecta a la finura o precisión de los cálculos, debe ser como mínimo de 16 píxeles adyacentes (5x5) al píxel del MDT sobre el que se quiera calcular cada variable geomorfológica (TURNER, 2007).

Algunas de las variables definidas y calculadas, que se consideraron de mayor interés para afinar la precisión conseguida con la aplicación de la metodología estandarizada, fueron las siguientes (Fig. 5):

- i. Aplanamiento (*Flatness*): da idea del contraste topográfico existente entre un píxel determinado y los píxeles adyacentes. Para su cálculo se aplicó un algoritmo basado en la diferencia entre la altura media de un píxel y la de los 16 píxeles adyacentes, y en relación, a su vez, con las alturas máxima y mínima del conjunto de píxeles incluidos en el análisis. El resultado final se expresó en % y en el caso de la “región-plan”, es el que aparece en la figura 5a.
- ii. Rugosidad (*Roughness*): este parámetro sirve para establecer la irregularidad de las formas del terreno. Su cálculo se deriva de considerar la varianza de la relación entre la altura del píxel central y la de los 16 píxeles adyacentes

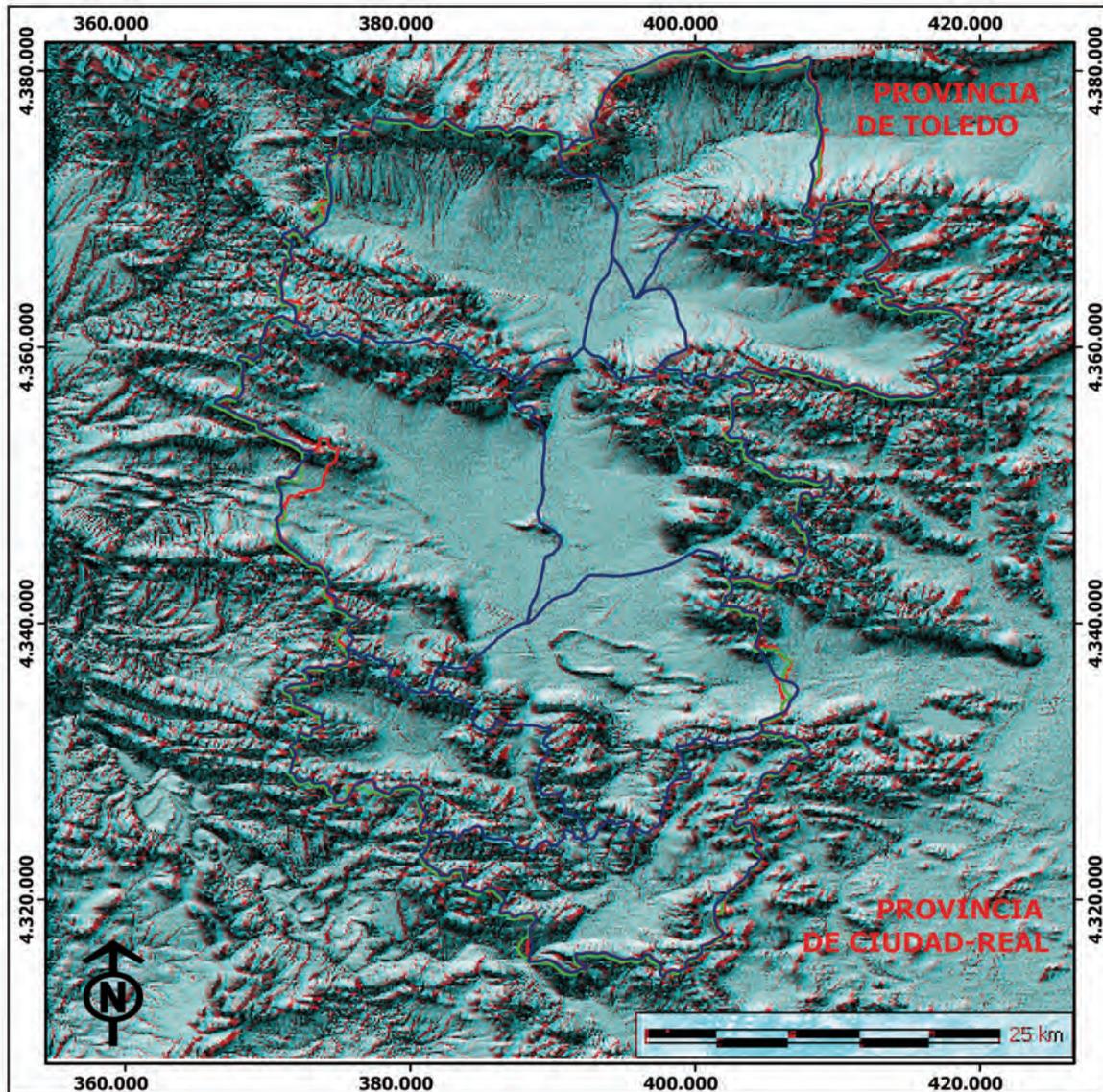


Figura 4.–Estereo-anaglifo (calculado sobre base a escala 1:50.000). La generación de este mapa es una primera etapa del método de contraste de la calidad de las delimitaciones geográficas, hechas utilizando procedimientos y datos estandarizados proporcionados por los organismos oficiales y técnicos.

–Stereo-anaglyph (calculated at a 1:50,000 scale). The generation of this map is a first phase of the process to validate the quality control of the geographical delimitations, done by using the standard dates and procedures provided by several official and technical entities.

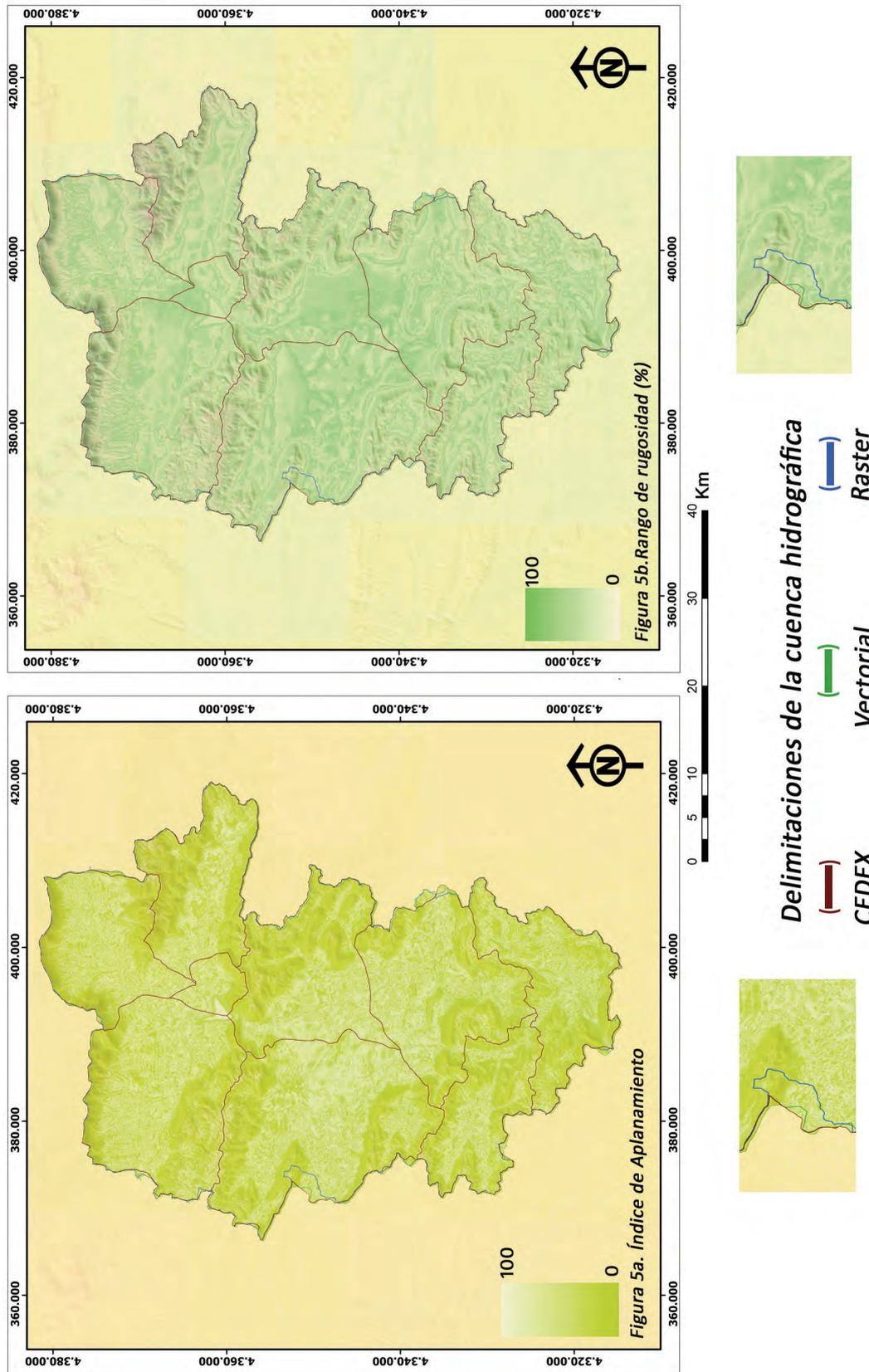
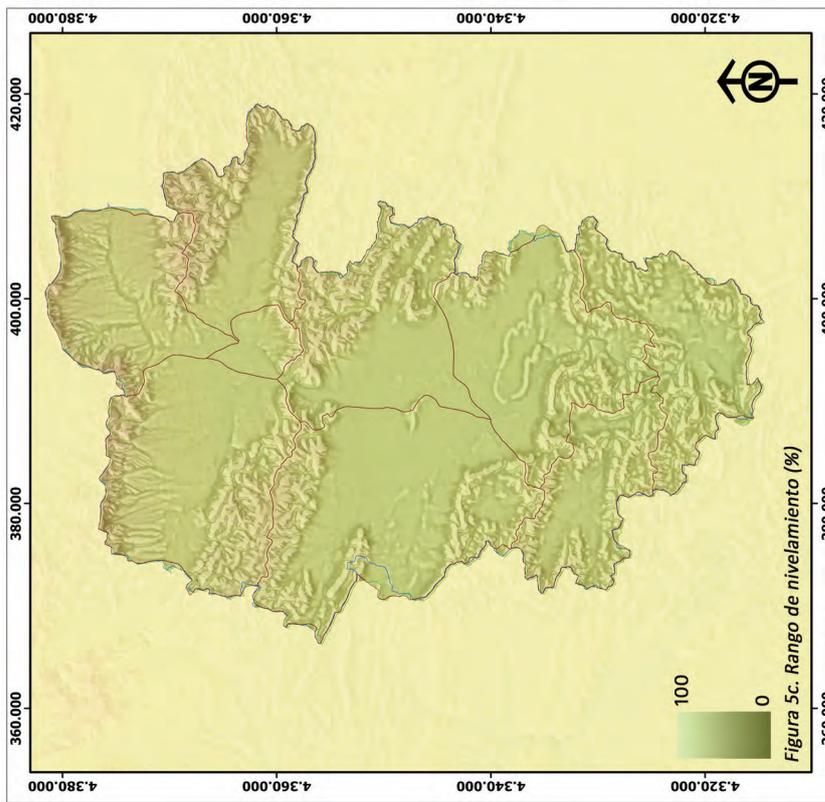
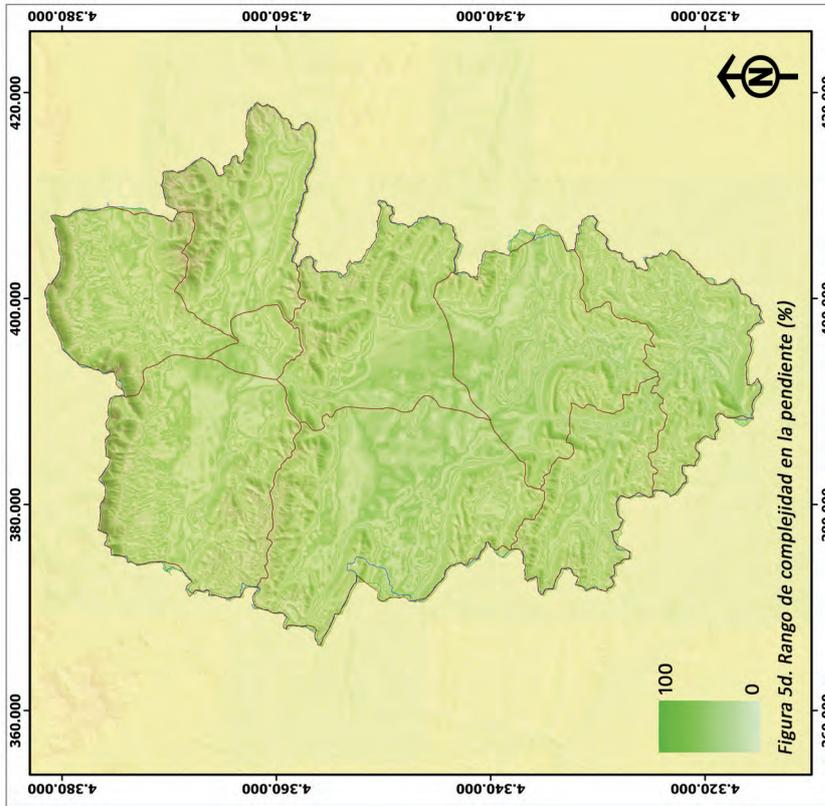


Figura 5.—Mapas de los parámetros morfométricos complejos (calculados sobre base a escala 1:50,000): a) Aplanamiento; b) Rugosidad; c) Nivelamiento; d) Complejidad de la pendiente.

—Complex morphometric parameter maps (calculated at a 1:50,000 scale): a) Flatness; b) Roughness; c) Levelness; d) Slopeyness.



Delimitaciones de la cuenca hidrográfica

(—) **CEDEX** (—) **Vectorial** (—) **Raster**

al mismo. Al igual que en el resto de los parámetros, este resultado se estandarizó para cada píxel en base a su contraste con los resultados obtenidos en el conjunto de la cuenca y se expresó como un % (Fig. 5b).

- iii. Nivelamiento (*Levelness*): permite conocer la falta de contraste topográfico existente entre un píxel concreto y los píxeles adyacentes al mismo. Para su cálculo basta con aplicar la inversa del algoritmo de aplanamiento (Fig. 5c).
- iv. Complejidad de la Pendiente (*Slopeyness*): da idea del grado de desnivel de un terreno concreto (en este caso de un píxel determinado en el MDE). Para calcularlo basta con analizar la relación entre la pendiente en un píxel (que se calcula teniendo en cuenta su relación con los píxeles adyacentes) y la pendiente media de los píxeles adyacentes (Fig. 5d).

Una vez obtenidos los parámetros anteriores, éstos se utilizaron como base para afinar la precisión en la delimitación de la “región-plan” cartografiada aplicando los algoritmos comerciales clásicos.

La necesidad de establecer criterios uniformes para la información cartográfica, obedece a las especificaciones contenidas en la directiva INSPIRE (Infraestructure for Spatial Information in Europe; Directiva 2007/2/CE, del 15 de Mayo del 2007). Esto implica no solo el control de calidad interno de la propia cartografía generada, sino también la obligación de conocer los niveles de calidad existentes en la cartografía de base utilizada y la incertidumbre potencialmente derivada de su utilización.

Este último objetivo se abordó a través de la consideración de estructuras flexibles (*fuzzy*), que se concretaron en la definición de un perímetro de prevención en el interior del cual se puede considerar que el error cometido en la delimitación es aceptable.

De esta manera, los conceptos derivados del “Principio de Incertidumbre de Heissemberg” (HEISSEMBERG, 1927) inicialmente relacionados de manera exclusiva con la mecánica cuántica matricial, encuentran aplicación en la ciencia regional. Ésta debe definir ahora zonas-límite difusas o abiertas, con una base matemática probabilística y que sirvan para superar los problemas generados por la utilización de metodologías de corte determinista (FARINÓS, 2001).

Para el cálculo de dicho perímetro, se ajustaron los nuevos límites mediante los puntos más lejanos de entre aquellos definidos por los diferentes algoritmos empleados y por las delimitaciones oficiales, obteniendo así un perímetro en el interior del cual se considera que existe una probabilidad,

variable pero siempre superior a 0, de encontrar los límites reales de la región.

Posteriormente se determina la red fluvial potencial aplicando HEC-GeoHMS y que define los interfluvios calculados matemáticamente; esto permite establecer la línea más probable correspondiente al límite real de la cuenca. El resultado conjunto de todo el proceso es el que aparece reflejado en la figura 6.

De manera paralela a la delimitación definitiva de la cuenca, se deben cuantificar las diferencias encontradas entre todas las delimitaciones efectuadas.

Tras llevar a cabo dicho análisis, se obtuvo una diferencia máxima de 3,526 km, correspondiente a la distancia existente entre las delimitaciones ráster y vectorial originales, que se localizó en el extremo occidental de la cuenca (Fig. 7).

Esta cifra aparentemente excesiva, resulta sin embargo tolerable en una región-plan que, como la cuenca del río Bullaque, presenta un perímetro que en ningún caso es inferior a los 324 km, con lo que el error máximo estimado corresponde a una cifra final del 0,001%.

El desarrollo del procedimiento para las escalas óptima (1:50.000) y utilitaria (1:200.000), permite deducir una serie de conclusiones entre las cuales destacan las siguientes:

- Existe una escasa fiabilidad en las delimitaciones efectuadas por los organismos oficiales (capa elaborada por el CEDEX). La causa debe buscarse no tanto en la inadecuada aplicación de los principios cartográficos derivados del efecto escala (MUÑOZ-ROJAS, 2006; MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2006a, 2006b, 2007, 2008), como en los posibles errores cometidos en la digitalización original de algunas capas de base. No obstante, para asegurar que el efecto escala se aplicó correctamente, fue necesario contrastar la información generada directamente por organismos oficiales con aquella otra que se generó automáticamente a partir de los algoritmos adecuados; por ejemplo, tras delimitar una cuenca hidrográfica a partir de un MDE a escala 1:200.000, se contrastaron los resultados con los datos proporcionados por el CEDEX (cartografía oficial estandarizada), detectándose notables diferencias.
- Resulta conveniente emplear varios algoritmos o métodos simultáneamente para poder contrastar resultados y corregir los posibles errores cometidos por cada uno de los mismos. Dichos algoritmos pueden ser utilizados directamente sobre las plataformas o programas

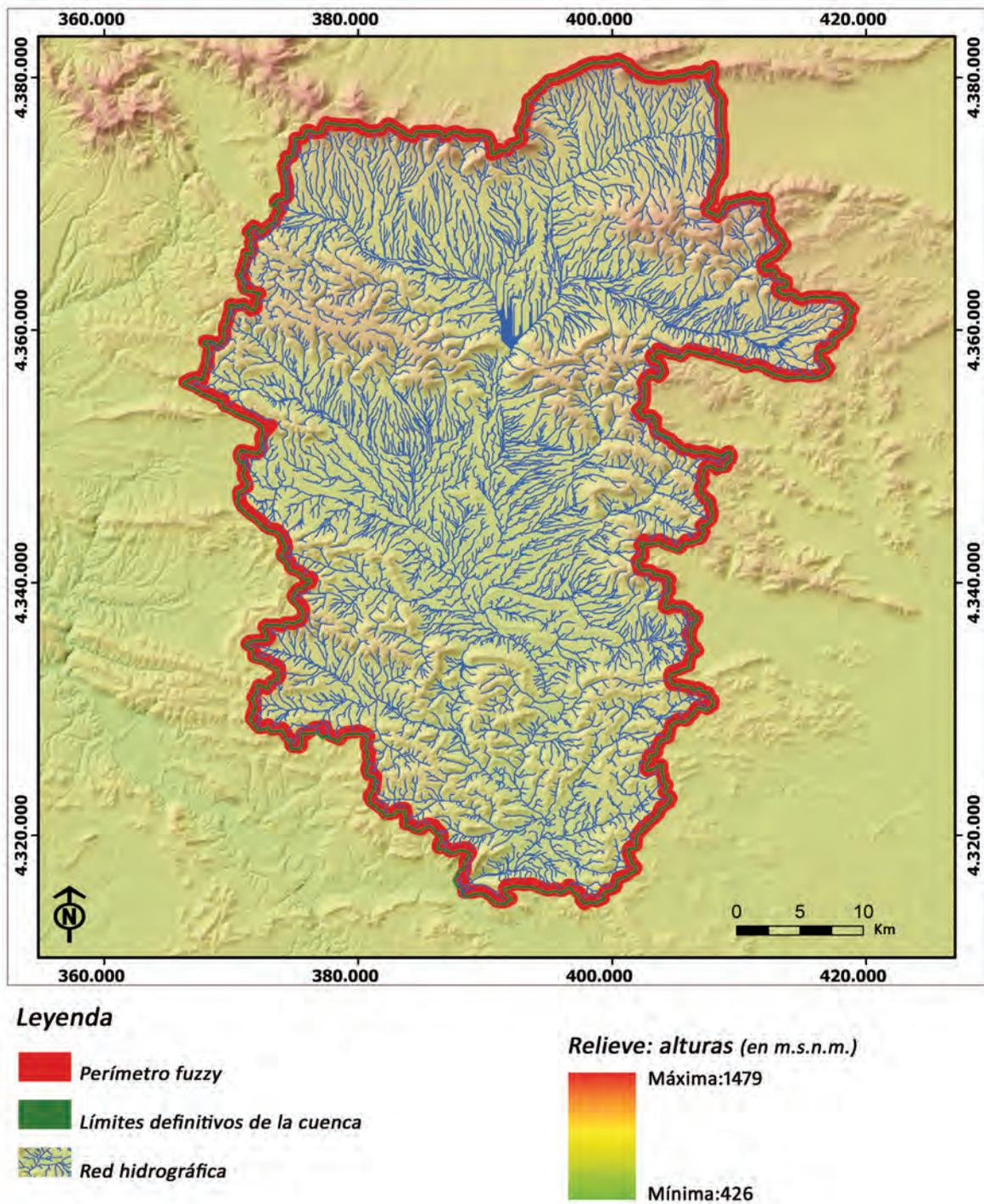


Figura 6.–Mapa de la delimitación definitiva de la cuenca del río Bullaque, incluyendo el perímetro de incertidumbre (*fuzzyness*) calculado sobre base a escala 1:50.000.

–Map of the definitive delimitation of the Bullaque river basin. This map includes the uncertainty-based perimeter (Fuzzyness) calculated at a 1:50,000 scale.

comerciales, si bien es recomendable implementar plataformas de programación propias sobre las que corregir los posibles errores; por ejemplo, sobre *Net-Beans*, que fue la plataforma de programación sobre la que, en lenguaje JAVA, se calculó la morfometría compleja de la cuenca.

- Existe una alta imprecisión en los resultados obtenidos con el empleo de algunos programas y algoritmos comerciales de amplia difusión. Esto resultó especialmente patente en las zonas periféricas de la cuenca con menor pendiente que, para su afinamiento, necesitaron ser contrastadas con variables geo-morfométricas complejas.
- Los algoritmos implementados sobre los programas de delimitación más comunes, presentan notables limitaciones a la hora de establecer diferencias con origen en el “efecto escala”. Esto quedó patente en las delimitaciones elaboradas con diferentes programas comerciales (HEC-GeoHMS, IDRISI y TAS), ya que dieron resultados idénticos entre sí para las dos escalas sobre las que se trabajó (1:50.000 y 1:200.000).
- Previamente al establecimiento de metodología para la regionalización de territorio, resulta imprescindible definir con claridad el criterio que se va a utilizar al determinar la región, ya que este puede resultar altamente variable al ser una función directa de las características de territorio y de los objetivos del trabajo. Si bien existe una larga tradición de regionalizaciones basadas en criterios bastante contrastados (naturales, culturales, económicos, políticos, etc.), la complejidad de los mismos ha aumentado paulatinamente.

Las regionalizaciones que se lleven a cabo en ámbitos mediterráneos, deben tener en cuenta la complejidad de los sistemas socio-ambientales que componen dicho ámbito (FOLCH, 1999; GÓMEZ DELGADO & BOSQUE SENDRA, 2004), lo que implica el papel central que se deberá otorgar a la incertidumbre en dicho proceso.

- En el caso de la regionalización aquí efectuada, que es hidrográfica y por tanto fisiográfica, los criterios de flexibilidad deben buscarse en los parámetros geométricos de la regionalización; concretamente en los límites de la propia región (cuenca del río Bullaque). Dichos límites pueden y deben establecerse desde una perspectiva difusa (*fuzzyness*), que permita controlar el error cometido al aplicar los diferentes métodos y algoritmos más frecuentes y proporcione una alternativa abierta

y flexible, de corte probabilístico (GÓMEZ DELGADO & BOSQUE SENDRA, 2004).

2.2. Unidades lito-morfológicas

Históricamente, la aplicación de la Geomorfología a la planificación territorial se ha materializado en la producción de una ingente cantidad de cartografía geomorfológica. Dicha cartografía identifica formas y procesos activos y relictos bajo distintas perspectivas (mofogenética, morfoestructural, morfodinámica) y la principal finalidad consiste en contribuir a determinar los usos y ocupaciones del suelo en la planificación (PEDRAZA *et al.*, 2006).

De hecho, la regionalización geomorfológica identifica unidades de relieve que, organizadas en diferentes niveles taxonómicos y de escala, se relacionan tanto con las formas fundamentales del terreno como con los procesos y riesgos potenciales que puedan tener lugar en el territorio (MARTÍN-DUQUE, 1997; PEDRAZA *et al.*, 2006).

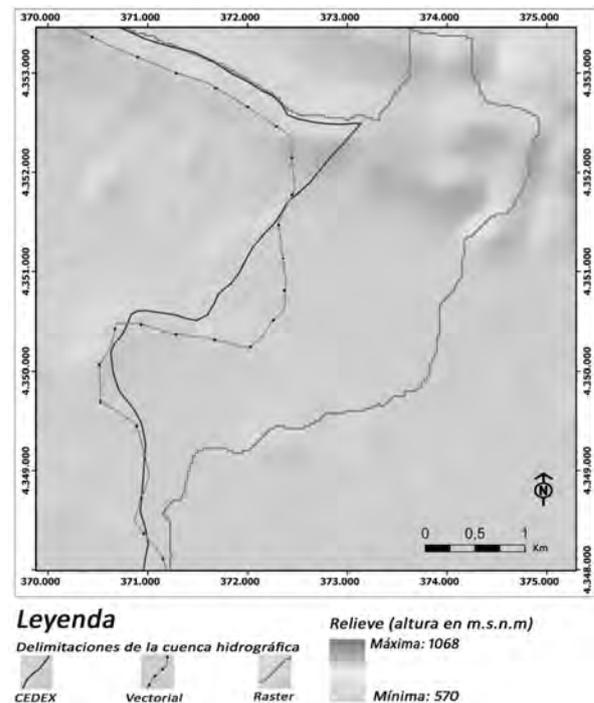


Figura 7.—Mapa resultante del cálculo, sobre base a escala 1:50.000, de las diferencias máximas entre las diversas delimitaciones de la cuenca fluvial, contenidas en las cartografías estandarizadas (proporcionadas por los organismos oficiales y técnicos).

—Map, calculated at a 1:50,000 scale, of the maximum differences found between diverse standard delimitations performed by several official and technical entities.

Para la identificación de las grandes unidades morfológicas del terreno a escala regional y sub-regional (*Land-Systems*, en la taxonomía anglosajona; ver MITCHELL, 1973), que son las que coinciden en la escala de trabajo con la ordenación del territorio, la primera opción posible era la que podía derivarse de la elección de un método fisiográfico.

Dicho método, que hemos empleado en la delimitación de la cuenca, parte de la información descriptiva del relieve obtenida mediante fotointerpretación y el análisis topográfico, para generar la regionalización geomorfológica a distintos niveles taxonómicos. Este trabajo es determinante en el diseño final de las unidades territoriales de ordenación (MARTÍN-DUQUE *et al.*, 2002). No obstante, el trabajo de identificación y descripción de estas unidades es más bien árido y prolongado, lo que disminuye su atractivo y utilidad directa.

Junto a las metodologías fisiográficas, existen otra serie de ellas denominadas genéricamente “analíticas o paramétricas”. Debido a su simplicidad y a su coincidencia conceptual con los métodos más actuales de trabajo con capas de información temática ligados a las TIG, estas metodologías se consideraron las más efectivas a la hora de abordar procesos de regionalización geomorfológica con fines en planificación, especialmente a escalas regionales y sub-regionales.

Entre las ventajas encontradas, destacan su menor consumo de tiempo y esfuerzo y su menor dependencia de la habilidad, u oficio, del planificador.

En los métodos analíticos o paramétricos, la superposición de capas temáticas (generalmente relacionadas con la geología y con el relieve, los dos elementos constituyentes de la Geomorfología) debe considerarse como parte de un proceso analítico, previo a la síntesis final de los diferentes parámetros analizados para generar las unidades territoriales homogéneas (MUÑOZ-ROJAS, 2006).

De las metodologías analíticas más conocidas, la de BRABYN (1998) se consideró la de mayor utilidad para la planificación de ámbitos sub-regionales mediterráneos y de otros taxones regionales caracterizados por su variabilidad ambiental y paisajística. Entre las cualidades encontradas en la misma, destacan su simplicidad y su adecuación a las condiciones ambientales del medio de estudio y a la finalidad del trabajo; esta metodología fue diseñada para regiones de clima mediterráneo en el continente austral y se llevó a cabo con fines de planificación.

Partiendo del método de BRABYN (1998), aquí se diseñó otro que utiliza como base unas unidades litológicas de síntesis (Fig. 8), determina sus características topográficas materializadas en

tipología de las pendientes, y establece así lo que denominamos en este caso “unidades lito-morfológicas de síntesis”. Para ello se debe calcular la pendiente media de cada unidad litológica de síntesis, y posteriormente asignar cada una de ellas a una unidad lito-morfológica.

Para optimizar la eficiencia de las unidades finalmente delimitadas, resulta imprescindible contar previamente con un cierto conocimiento de las características paisajísticas y geomorfológicas de la “región-plan”. En el caso de la cuenca del río Bullaque, dicho conocimiento provenía del trabajo exhaustivo efectuado en la misma durante los cuatro últimos años por los redactores del presente artículo y algunos resultados se han expuesto ya en una serie de comunicaciones a congresos científicos (MUÑOZ-ROJAS, 2007; MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2006a, 2006b, 2007, 2008) y de proyectos de investigación (MUÑOZ-ROJAS, 2006).

Al igual que en el caso de la Geología, tanto las pendientes (clasificadas en rangos) como las unidades lito-morfológicas finales deben ser re-clasificadas para asegurar la utilidad de las unidades definidas. Así resultan una serie de categorías que son coherentes con la escala, con los objetivos y con los condicionantes de la planificación.

En cuanto a la pendiente, ésta fue reclasificada tomando como base una clasificación directamente relacionada con la planificación, y que no es otra que la elaborada por Demek y adaptada desde E. Schölz a los ambientes mediterráneos (ver PEDRAZA *et al.*, 1996).

No obstante, las categorías de pendientes propuestas no son universalmente útiles, siendo la escala de trabajo la que define finalmente la clasificación más adecuada, que además varía en función de la aplicación que se quiera dar a la misma. Así, los métodos para la estimación de la erosión potencial, los modelos mecánicos de caídas, deslizamientos y soliflucción, y los modelos hidráulicos de cálculo de avenidas, conllevan en cada caso una clasificación diferenciada de las pendientes. Sin embargo, la propuesta para este trabajo es la que mejor aglutina los diferentes procesos que pueden tener lugar en un territorio complejo (PEDRAZA *et al.*, *op. cit.*).

La utilización de dicha clasificación permite relacionar a cada unidad geomorfológica delimitada con una serie de formas del terreno, en función de su rango de pendientes, de procesos y riesgos y de condiciones para la ordenación de usos y actividades antrópicas.

Por tanto, la categorización de la pendiente debía servir para generar una primera imagen de las potencialidades para la planificación de las unidades lito-morfológicas a elaborar.

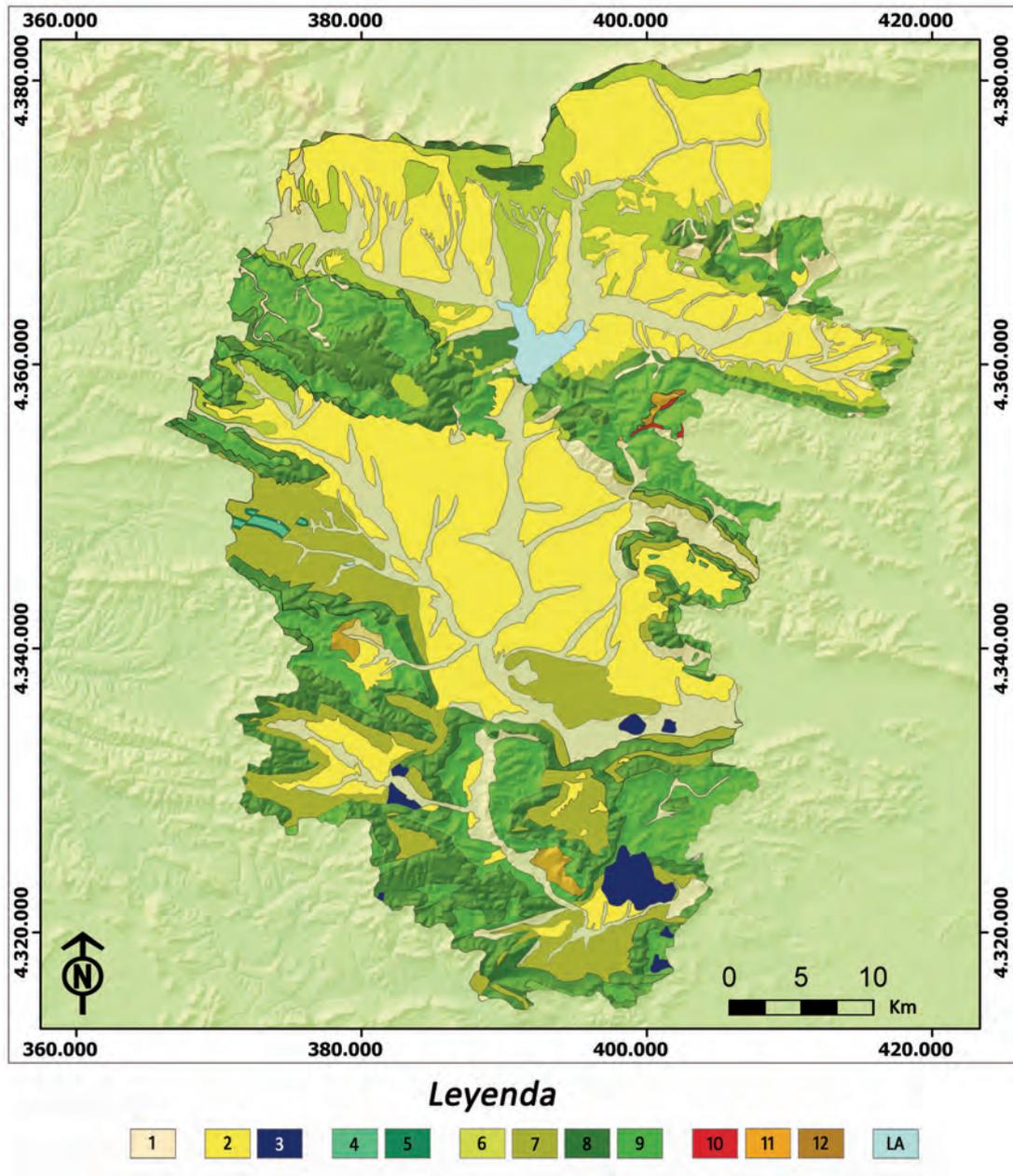


Figura 8.

Dado que tanto la escala original del Mapa Geológico de Síntesis, como la del Mapa Lito-morfográfico de salida debían referirse en una escala única, hubo que adaptar las pendientes a la escala correspondiente a la litología, que era la mayor posible del rango seleccionado (1:200.000). Para ello se transformó el rango de las isohipsas desde los 20 m a los 100 m de la escala final, y también la resolución espacial del *grid* a 200 m.

Al llevar a cabo la correlación de las pendientes reclasificadas y las clases litológicas, un primer problema detectado fue el de la alta variabilidad (rango) de pendientes existentes para algunas clases litológicas (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008).

Este hecho determinó la conveniencia de utilizar la pendiente media extraída para cada litología, lo que debía ayudar a suavizar los problemas derivados de las situaciones extremas (BRABYN, 1998; MUÑOZ-ROJAS, 2006).

Una vez calculadas las pendientes media, máxima y mínima de cada tipo de material, hubo que reclasificar las mismas para poder analizar qué clase de pendiente se correspondía con cada material a la nueva escala y nivel de resolución.

Para este paso se usó un criterio diferente al utilizado a escala 1:50.000, dado que las pendientes medias deben situarse en rangos menores que las extremas, por lo cual y en función de lo determinado por BRABYN (1998), los rangos utilizados fueron los siguientes:

**0-3°=Baja-Nula; 3-6°=Media-Baja;
6-9°= Media-Alta; >9°=Alta-Muy Alta**

Finalmente, fue la correlación de las litologías con sus pendientes medias lo que permitió llevar a cabo la identificación de las unidades lito-morfográficas de síntesis finales, que son las siguientes:

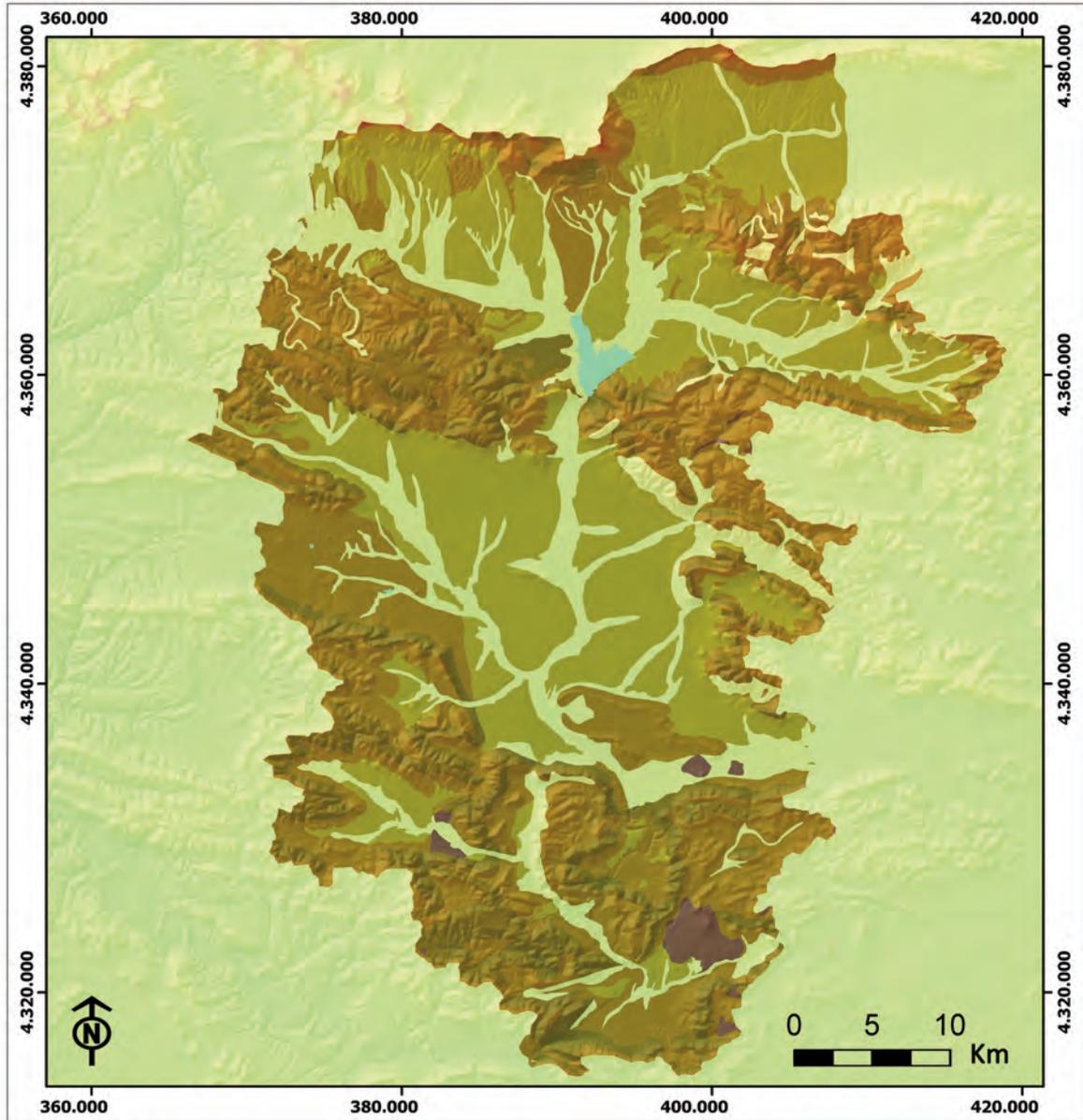
- **Crestas de las sierras (Unidad 1).** Esta unidad coincide con la cuarcita armoricana; son resaltes en materiales duros y con valores elevados de las pendientes (crestas de los relieves apalachanos).
- **Relieves alomados y cuestras sobre materiales paleozoicos (Unidad 2).** Formas desarrolladas sobre series heterogéneas en las que dominan las alternancias de materiales duros y blandos (cuarcitas, pizarras y conglomerados) y las formaciones detríticas inferiores. Son relieves de poco contraste y con valores bajos de pendiente.
- **Piedemontes y rañas (Unidad 3).** Esta unidad se corresponde también con series de materiales heterogéneos compuestas por arenas, arcillas, calizas, margas y yesos. Son relieves de mínimo contraste, pendientes muy bajas y que sirven de enlace entre las crestas y cuestras apalachenses y los valles labrados por los cursos fluviales.
- **Relieves volcánicos (Unidad 4).** Asociados a los complejos de Espilitas y Umbría-Pipeta y a los conos volcánicos del Campo de Calatrava. Son relieves con grandes contrastes y pendientes variables.
- **Fondos de valle y depósitos fluviales (Unidad 5).** Conformados por los depósitos aluviales

Figura 8.—Mapa de las unidades litológicas de síntesis a escala 1:200.000, que son las utilizadas como base de la definición y delimitación de unidades lito-morfográficas.

LEYENDA: 1) Gravas, cantos poligénicos y limos (aluvial, terrazas, conos de deyección y depósitos de vertiente). Cuaternario. 2) Gravas, conglomerados con cantos y bloques de cuarcita, a veces con corazas ferralíticas (rañas y formaciones asociadas); localmente calizas y margas. Pleistoceno inferior- Plioceno. 3) Formaciones volcánicas “Campo de Calatrava”: lavas (nefelinitas y melilititas olivínicas). Pleistoceno inferior-Plioceno. 4) Pizarras negras ampelíticas; localmente cuarcitas y calizas. Silúrico Inferior (Wenlock-Llandovery). 5) Cuarcitas claras (Facies de Criadero). Silúrico Inferior (Llandovery). 6) Pizarras con *Neseuretus*; localmente niveles de pizarras-areniscas-cuarcitas o de tobas y tuffitas (Sills subvolcánicos). Ordovícico Medio (Llandeilo-Llanvir). 7) Alternancia de cuarcitas, pizarras y areniscas. Ordovícico Inferior a Medio (Llanvir-Arenig). 8) Ortocuarzitas (Facies armoricana). Ordovícico Inferior (Arenig). 9) Cuarcitas, areniscas, limolitas, pizarras y conglomerados basales. Ordovícico Inferior (Arenig). 10) Rocas vulcano-sedimentarias. Cámbrico Inferior. 11) Serie detrítica inferior: limolitas, pelitas, pizarras, conglomerados y cuarcitas. Cámbrico Inferior-Precámbrico. 12) Serie carbonática inferior: calizas, dolomías, cuarcitas, pizarras y grauvacas. Cámbrico Inferior-Precámbrico. LA) Láminas de agua (embalses).

—Lithologic Synthetic Units map, at a 1:200.000 scale, used as a basis for the latter definition and delimitation of lithomorphographic units.

LEGEND: 1) Gravels, polygenic pebbles, silts (flood plains, alluvial terraces, alluvial and debris cones, colluviums). Quaternary. 2) Gravels, conglomerate of quartzitic pebbles and boulders, sometimes with ferralitic soils (rañas and associated formations); locally limestones and marls. Early Pleistocene-Pliocene. 3) “Campo de Calatrava” volcanic formations: lavas (olivine nefelinites and melilitites). Early Pleistocene-Pliocene. 4) Black ampelitic slates; locally quartzites and limestones. Early Silurian (Wenlock-Llandovery). 5) Black quartzites (Facies of Criadero). Early Silurian (Llandovery). 6) Slates with *Neseuretus*; locally and interstratified, slates-sandstones-quartzites and tuffs and tuffites (subvolcanic sills). Middle Ordovician (Llandeilo-Llanvir). 7) Alternance of quartzites, slates and sandstones. Middle to Early Ordovician (Llanvir-Arenig). 8) Orthoquartzites (American Facies). Early Ordovician (Arenig). 9) Quartzites, sandstones, limolites, slates and “basal conglomerates”. Early Ordovician (Arenig). 10) Volcano-sedimentary rocks. Early Cambrian. 11) Lower detritic serie: limolites, pelites, slates, conglomerates and quartzites. Early Cambrian-Precambrian. 12) Lower carbonatic serie: limestones, dolomites, quartzites, slates and grauvagues. Early Cambrian-Precambrian. LA) Water sheet (reservoir).



Leyenda

Unidades lito-morfológicas

	Crestas cuarcíticas		Relieves volcánicos
	Cuestas y relieves alomados		Fondos de valle y terrazas
	Piedemontes y rañas		Masas de agua

Figura 9.–Mapa de las unidades lito-morfológicas de síntesis a escala 1:200.000.

–Lito-morphographic synthetic units map at a 1:200.000 scale.

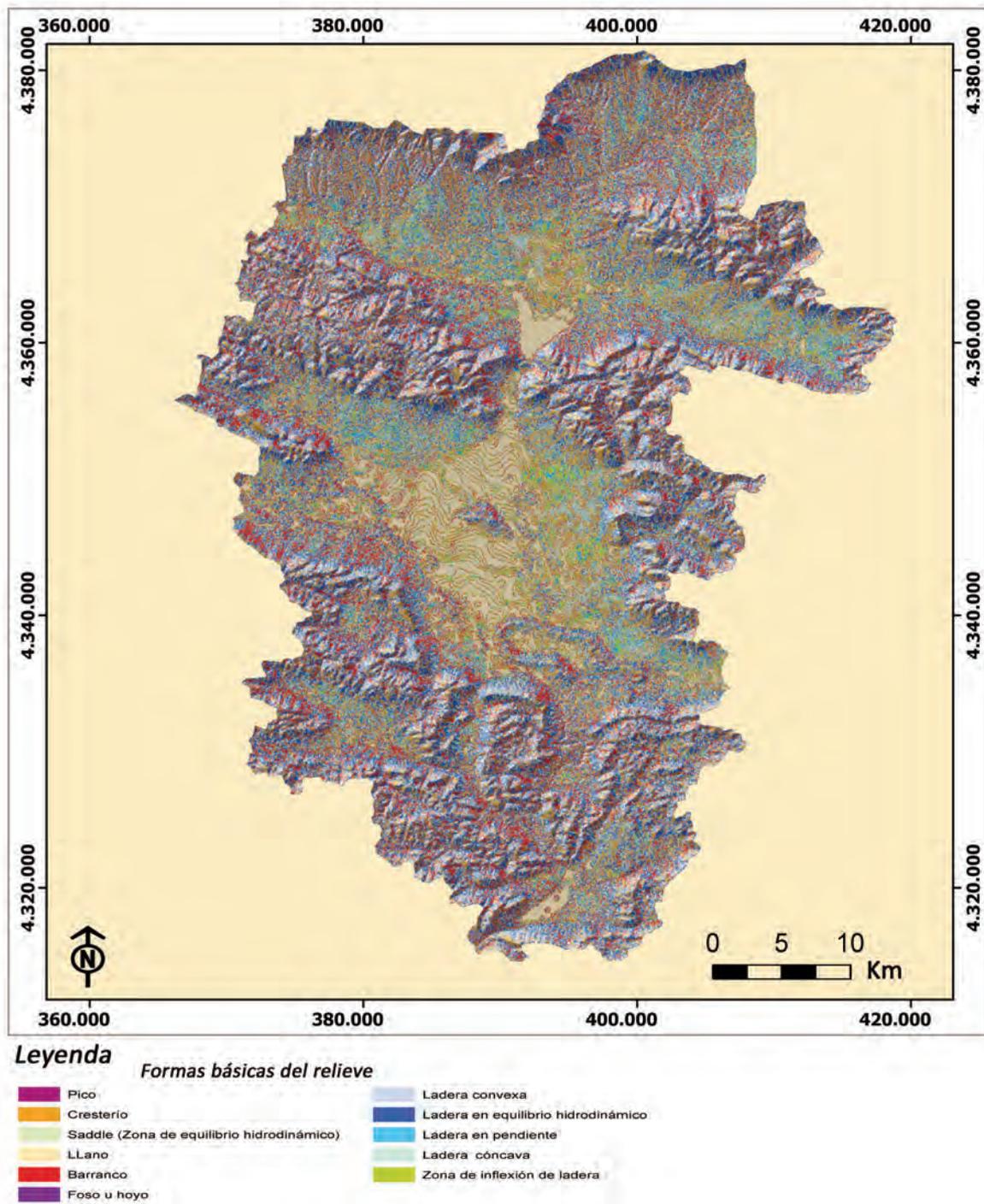


Figura 10.–Mapa de las “formas básicas del relieve”, delimitadas aplicando el algoritmo de PELLEGRINI (1996) sobre base a escala 1:50.000.

–Basic landforms map delimited using Pellegrini’s classic algorithm (1996); calculated at a 1:50,000 scale.

cuaternarios en materiales finos como arenas, arcillas y limos. Son relieves de pocos contrastes y valores muy bajos de las pendientes.

Como se puede observar, se trata de tipologías de relieves muy generales, o de síntesis, que corresponden a escalas intermedias, regionales y sub-regionales. Ésta es la escala normal de trabajo utilizada en España para lo que se ha venido denominando hasta ahora ordenación del territorio que, consecuentemente, deja las escalas de detalle limitadas a trabajos de Urbanismo, entendido éste como un proceso de “calificación” del suelo a ocupar preferentemente por infraestructuras (MARTÍNEZ DE ANGUITA, 2006).

En el caso que tratamos aquí, para un análisis correspondiente a escalas menores al sub-regional, resulta imprescindible recurrir a trabajos de fotointerpretación, tanto digital como analógica o manual, relacionados con las metodologías fisiográficas (MARTÍN-DUQUE, 1997; MARTÍN-DUQUE *et al.*, 2002).

Como se puede observar en la figura 9, las unidades lito-morfológicas de síntesis finalmente delimitadas se encuentran perfectamente correlacionadas, tanto con las grandes unidades del relieve (Fig. 1) como con las unidades geológicas de síntesis (Fig. 8), lo cual resulta indicativo de lo correcto de los criterios empleados.

Para determinar el grado de eficacia de este sistema de clasificación, es necesario proceder a una validación del mismo. Este proceso, que se trata detalladamente en el apartado 2.3 de este trabajo, consiste en cuantificar el nivel de incertidumbre y para ello hemos acudido a una metodología basada en la complejidad geométrica de las formas del terreno (fractales y *Fuzzyness*).

Mediante la aplicación de ambas estrategias y como base para comprobar lo adecuado de la clasificación realizada, en el caso de que la incertidumbre generada sea tal que impida la fiabilidad de los resultados, se puede llegar a sugerir la necesidad de establecer nuevas categorías o bien de tener que modificar las existentes.

Para esa validación y con el fin de establecer el nivel de confianza implícito en la delimitación de las unidades lito-morfológicas, resulta imprescindible cuantificar el porcentaje de superficie en que existen incongruencias entre las categorías contrastadas, de manera que se pueda poner en evidencia el grado de incertidumbre con que se está jugando al trabajar con unidades sintéticas o en cualquier proceso de toma de decisiones espaciales y territoriales.

A este respecto, hay que tener sumo cuidado en que las capas que se contrasten entre sí se

encuentren todas ellas a la misma escala de origen, de manera que eliminemos uno de los errores más comunes que se derivan de la reciente popularización de las herramientas TIG.

2.3. Análisis de la incertidumbre en la delimitación de las formas del terreno

2.3.1. Incertidumbre en las formas del terreno (*Fuzzy-logic*)

El análisis *Fuzzy* permite estudiar la pertenencia de cualquier elemento a una serie de categorías teóricamente cerradas (*clusters*), definiendo nuevas categorías mixtas.

Esta metodología de trabajo tiene gran interés en los estudios geomorfométricos, y en sus aplicaciones en planificación (ARRELL *et al.*, 2006; SCHMIDT & HEWITT, 2004).

Para llevar a cabo el análisis *Fuzzy* de las formas del terreno en la “región-plan”, en primer lugar se implementó el algoritmo diseñado por PELLEGRINI (1996) utilizando una plataforma JAVA elaborada previamente; así se obtuvieron las formas básicas del terreno (Fig. 10).

Analizando el conjunto de formas resultantes de la aplicación directa del algoritmo de Pellegrini, se detectan una serie de problemas conceptuales y aplicativos, lo que implica una alta incertidumbre esperable de su uso.

Entre los problemas detectados destaca, en primer lugar, el hecho de que se utilicen criterios no homogéneos para determinar las diferentes formas del terreno. Por ejemplo, en las cuestas o laderas se mezcla un criterio morfodinámico con otro morfológico.

Otro problema a considerar es la aparente falta de fiabilidad deducible de la excesiva extensión calculada para determinadas formas concretas (por ejemplo, crestas y barrancos) y la falta de adecuación aparente del nivel de detalle obtenido a la escala de referencia utilizada, que en este caso era de 1:200.000.

Con el fin de establecer las correcciones oportunas, se elaboró una reclasificación de las formas del terreno que, dadas las características del relieve de la zona, se consideraron como diferentes componentes de las vertientes.

En este sentido, las laderas no incluidas en la clase de las que se definían por su situación de equilibrio hidrodinámico se consideraron laderas en desequilibrio y, por tanto, laderas susceptibles de sufrir cambios geomorfológicos espontáneos. La reclasificación final de las categorías de formas es la que se muestra en la tabla I.

Para analizar la incertidumbre inherente a las nuevas categorías obtenidas, en primer lugar se

Tabla-I.–Equivalencias existentes entre las formas resultantes de la aplicación del “algoritmo de Pellegrini” (PELLEGRINI, 1996) y la clasificación adaptada al tipo de vertientes.

–Existing equivalences between landforms resulting from the application of Pellegrini’s algorithm (PELLEGRINI, 1996) and the classification adapted to the types of slopes.

Clasificación automática (Formas fundamentales)	Clasificación Adaptada (Tipos de vertientes)	
Picos	Picos	
Crestas	Crestas	
<i>Saddle</i>	<i>Saddle</i> (zona en equilibrio morfodinámico)	
Barranco	Barranco	
Foso u hoyo	Foso u hoyo	
Ladera en equilibrio hidrodinámico	Ladera en equilibrio hidrodinámico	
Ladera convexa	Ladera en desequilibrio hidrodinámico	Ladera convexa
Ladera cóncava		Ladera cóncava
Ladera en pendiente		Ladera en pendiente
Zona de inflexión de laderas	Zona de inflexión de laderas	

estudió la relación real existente entre cada tipo de vertiente y cada unidad lito-morfográfica. Para ello se calculó la superficie proporcional ocupada por aquellas formas básicas del terreno que aparecen sobre unidades lito-morfográficas con las que no deberían corresponderse.

El porcentaje total de este tipo de resultados anómalos, o inesperados, en relación con la superficie total correspondiente a cada unidad lito-morfográfica, fue considerado como el nivel de incertidumbre empíricamente calculado (Tabla II).

A partir de dicho análisis, se extrajeron las conclusiones que se detallan en los siguientes puntos:

- Las masas de agua contienen algunos puntos de su superficie que, según la cartografía de formas del terreno (Fig. 10), se corresponden con llanos, *saddles*, barrancos o laderas convexas. A la categoría de “llanos” pertenece aproximadamente el 84% de la superficie total ocupada por las masas de agua, el 15% restante se reparte entre las otras cuatro categorías antes citadas. No obstante, la escasa magnitud del error, así como la dificultad de establecer los límites de masas de agua fluctuantes (en este caso la principal masa de agua es un embalse), llevó a considerar a este primer detalle como un error completamente aceptable.
- Únicamente el 1,11% de la superficie de las crestas en cuarcitas determinadas en la elaboración de las unidades lito-morfográficas,

Tabla-II.–Incertidumbre calculada como el porcentaje de superficie de cada unidad lito-morfográfica, sobre la que se identificaron tipos de vertientes con las que en teoría no se deberían corresponder.

–Uncertainty calculated as the percentage of surface occupied by each litho-morphographic unit, within which certain types of unexpected slopes were identified.

Unidad lito-morfográfica	Incertidumbre calculada (%)
Masas de agua	9,765
Fondos de valle y terrazas	36,569
Piedemontes	33,203
Relieves alomados y cuestras	36,864
Crestas apalachanas	63,550
Relieves volcánicos	7,653

corresponden a la categoría de crestas establecidas según el algoritmo de identificación de formas fundamentales del terreno (PELLEGRINI, 1996). El resto de la superficie de los terrenos ocupados por crestas (el 98,89%) aparece incluido en otras categorías morfológicas; más de un tercio corresponde a la categoría de “ladera en equilibrio hidrodinámico”, mientras que el 45% restante se distribuye equitativamente entre barrancos y laderas convexas y cóncavas.

Lo anterior implica que hay que considerar las posibles “discrepancias conceptuales” entre el método de determinación matemática (aplicando el algoritmo citado) y el clásico de

la cartografía basada en las unidades litológicas y morfológicas. En los casos de la asimilación de las crestas dentro de la categoría de las laderas, puede deberse a la dimensión de los resaltes (crestas) en el conjunto de la vertiente que, en su mayoría, queda catalogada como ladera. Mayor problema deriva de la existencia de algunos casos en los que las crestas aparecen catalogadas como formas de terreno llanas; no obstante en esta catalogación representa únicamente el 0,0033% por lo que puede considerarse una desviación no relevante.

- En las unidades lito-morfológicas identificadas como cuestras y relieves alomados, el problema es de mayor magnitud, dado que el 17,318% de la superficie de las mismas queda catalogado como crestas, lo cual no es asumible. También destaca por su inconsistencia lógica que más del 18% de la superficie de esas unidades se incluya en la categoría de barrancos y casi 1% en cuestras y llanos. Por otro lado, las laderas en equilibrio hidrodinámico ocupan un tercio de las zonas de las cuestras y relieves alomados, lo que resulta indicativo de la probable estabilidad de las mismas.
- Las zonas de piedemonte son consideradas con pendiente media-baja y que sirven de enlace entre los fondos de valle y los relieves alomados periféricos de las crestas apalachanas y los relieves volcánicos. La presencia en un 19,627% de las formas básicas de este tipo que quedan clasificadas como crestas, resta fiabilidad a la delimitación efectuada. Al igual que se indicó para los relieves alomados y en el caso de que la clasificación fuera finalmente considerada válida, la abundante presencia de laderas en equilibrio hidrodinámico dotaría a esta unidad de una alta resiliencia frente a la ocurrencia de procesos desencadenantes de riesgos geomorfológicos.
- Con los fondos de valle y terrazas, al igual que ocurría para las crestas cuarcíticas y relieves alomados, se detectó un nivel de incertidumbre no asumible. Dicha afirmación se basa en el hecho de que casi un 20% (19,626%) de la superficie total ocupada por esta unidad, en la aplicación del algoritmo de Pellegrini se corresponde con formas identificadas como crestas, siendo únicamente el 6,5% de la superficie total de esta unidad la correspondiente a formas llanas.
- Por último, en los relieves volcánicos la incongruencia principal es que en algunos casos se clasifican como crestas, probable-

mente coincidentes con la existencia de pitones volcánicos (7,65% de su superficie). No obstante, la alta variabilidad de estos relieves y la heterogeneidad de los cerros, pitones, lagunas y macizos que lo componen (GONZÁLEZ CÁRDENAS *et al.*, 2004), implica la necesaria variabilidad de las formas básicas de estos terrenos, lo que confiere a la clasificación una mayor flexibilidad y, por tanto, una mayor certidumbre que al resto de unidades lito-morfológicas.

El tipo de desajustes detallado en los puntos anteriores, no hace sino confirmar la incertidumbre que se produce al trabajar con procedimientos que utilizan de partida parámetros morfométricos simples y algoritmos matemáticos distintos.

El hecho de que las unidades litomorfológicas de síntesis sean producto de la utilización de valores medios de la pendiente (BRABYN, 1998), determina su necesaria heterogeneidad e implica que la causa principal de la incertidumbre radique fundamentalmente en la naturaleza imprecisa de las unidades territoriales resultantes; por ello, la identificación de formas fundamentales del terreno mediante procedimientos cartográficos tradicionales, es una técnica sobre la que pueden plantearse algunas dudas metodológicas y conceptuales.

2.3.2. Fractales

La teoría de fractales, enunciada por MANDÉLBROT (1982), pretende analizar la complejidad geométrica de algunas formas de la naturaleza que no responden a las leyes de la geometría euclidiana clásica.

Para ello se determinan formas (fractales) que se comportan de manera autosemejante respecto a la escala, que se definen por su enorme complejidad formal y que responden de manera anómala respecto a su medida (LÓPEZ ARIAS, 2000).

En definitiva, la dimensión fractal (cualidad fractal de cualquier forma) da idea de la complejidad e impredecibilidad de determinadas formas geométricas aparentemente sencillas. Dicha magnitud resulta de extrema utilidad para los estudios de paisaje (FORMAN, 1995; BUREL & BAUDRY, 2002) y, en este caso que nos ocupa, para determinar sus componentes geomorfométricos (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008) (Fig. 11 y Tabla III).

Al calcular los estadísticos descriptivos básicos (media, desviación típica y varianza) de la dimensión fractal de cada unidad lito-morfológica, se observa que los mayores valores corresponden a las crestas y los relieves volcánicos.

Tabla-III.–Descriptivos estadísticos básicos de la dimensión fractal de las formas del terreno, calculados para cada unidad lito-morfológica delimitada.

–Basic statistical descriptors of the fractal dimension of the landforms calculated for each delimited lithomorphographic units.

Unidad lito-morfológica	Dimensión fractal	Desviación típica	Varianza
Masas de agua	1,0875	0,164	0,027
Crestas	1,2314	0,182	0,033
Relieves alomados y cuevas	1,1388	0,185	0,034
Piedemontes	1,1708	0,205	0,042
Fondos de valle y terrazas	1,1623	0,201	0,040
Relieves volcánicos	1,2255	0,169	0,029
Cuenca del Bullaque	1,1440	0,189	0,036

En consecuencia, va a ser en esas dos unidades lito-morfológicas donde la incertidumbre asociada a la geometría de sus formas del terreno será mayor, mientras que las masas de agua presentan los mayores niveles de homogeneidad y simplicidad morfológica.

No obstante y dado que la dimensión fractal media es únicamente un parámetro de tendencia central, para definir con claridad la diversidad interna hace falta incluir parámetros de dispersión estadística. Entre dichas variables, es la varianza la que resulta conveniente utilizar con el fin establecer comparaciones entre parámetros que se caracterizan por estadísticos de centralidad de diferente magnitud (FERIA TORIBIO & CAMARILLO NARANJO, 1999).

Los mayores niveles de varianza corresponden a los piedemontes y a los valles y terrazas. Esto parece indicar que la complejidad de las formas del terreno recogida en ambas unidades no es la mayor en términos de centralidad, pero si lo va a ser la diversidad interna de dicha complejidad.

Con las crestas y relieves volcánicos va a ocurrir al contrario, de manera que si bien la complejidad de las formas geométricas que las conforman es enorme, la variación en dicha complejidad va a ser más bien baja.

Al analizar conjuntamente los resultados de la aplicación de los dos parámetros utilizados para estudiar la complejidad en las formas del terreno, se infiere que la incertidumbre generada para cada unidad lito-morfológica delimitada varía en función de que se utilice una u otra metodología.

Una unidad lito-morfológica donde existe coincidencia en los resultados obtenidos con ambas técnicas, es la correspondiente a las “Crestas Cuarcíticas de los Relieves Apalachanos”. Dichos relieves son considerados unánimemente como la unidad dotada de una mayor complejidad e incertidumbre en lo que respecta a su naturaleza geomorfológica.

En el extremo opuesto se encuentran las masas de agua, representadas aquí de manera exclusiva por el Embalse de Torre Abraham, que presentan así la menor complejidad, o lo que es lo mismo, la mayor simplicidad geomorfológica de entre todas las unidades.

No obstante este último resultado debe ser matizado, dado que el MDE editado en 2008 por el Instituto Geográfico Nacional y a partir del cual se calcularon tanto la dimensión fractal como las unidades lito-morfológicas, no incluye datos Radar relativos a una parte de la batimetría; en periodos secos de climas mediterráneos como el que caracteriza a la cuenca del río Bullaque, dicha batimetría corresponden en realidad a una altimetría (MÁRQUEZ PÉREZ, 2004).

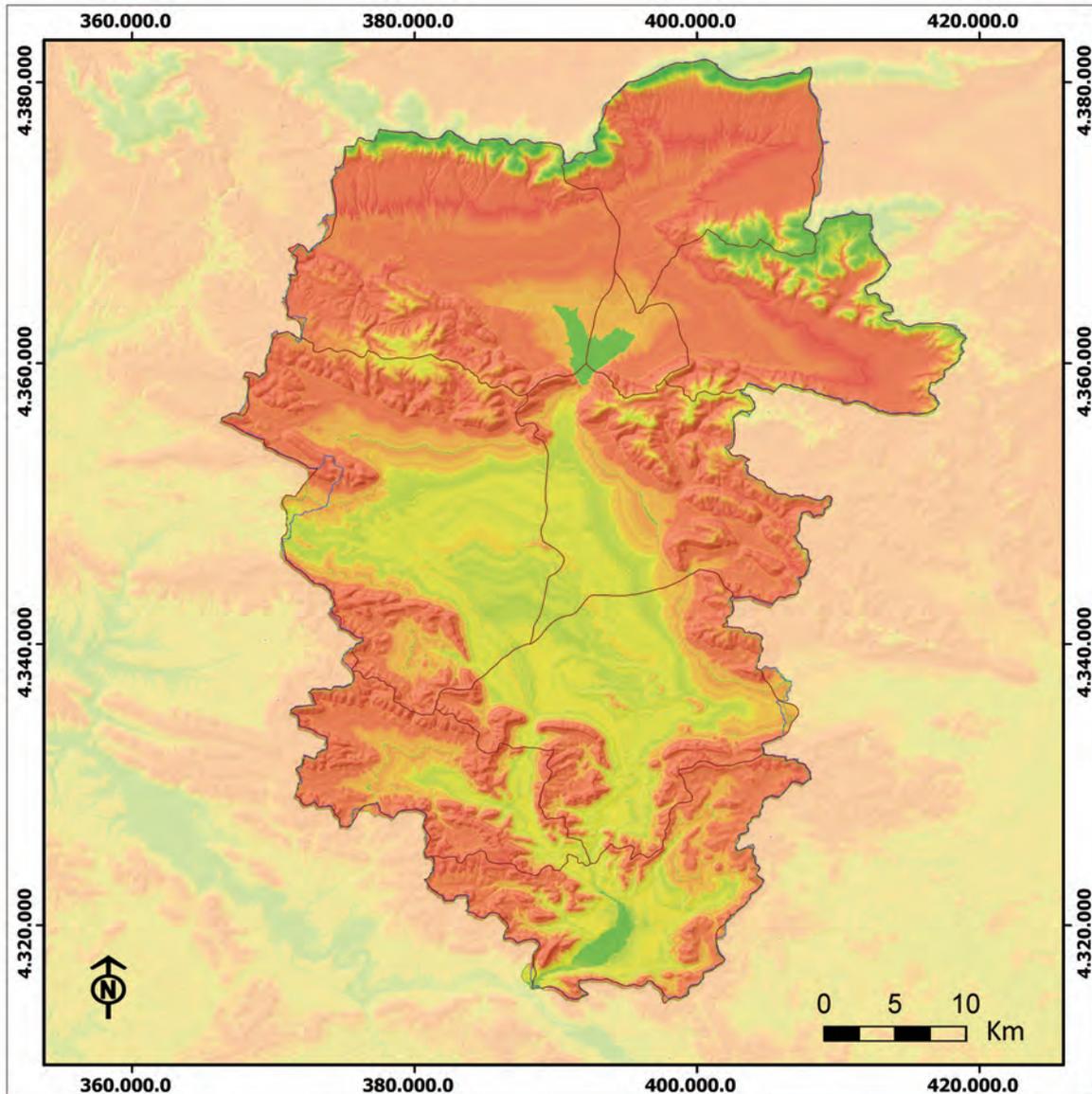
Frente a las unidades lito-morfológicas para las que se obtuvieron datos esperables respecto a su complejidad geomorfológica (masas de agua y crestas), los fondos de valle y terrazas aluviales que habían sido caracterizados como de alta incertidumbre y complejidad topográfica, presentaron en cambio una dimensión fractal cercana a 1, lo que resulta indicativo de su homogeneidad interna.

Esta incongruencia entre los resultados obtenidos por ambos métodos (el clásico de las clasificaciones geomorfológicas regionales y el basado en la incertidumbre), puede considerarse un factor atenuante al juzgar la validez de cualquiera de los mismos (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008). No obstante, hay una conclusión evidente: el alto nivel de complejidad real de la morfología del terreno y que subyace tras la aparente simplicidad de los resultados obtenidos por la Geomorfología Regional clásica al clasificar las formas del relieve.

3. DISCUSIÓN GENERAL

La Geomorfología Regional, como disciplina científica encargada de explicar la configuración espacial de las formas del relieve a escala regional y sub-regional, ha sido considerada tradicionalmente como un elemento clave para la ordenación del territorio (MARTÍN-DUQUE *et al.*, 2002).

Sin embargo, con el tránsito reciente desde una ordenación centrada en la planificación física con base en la asignación de usos del suelo, hacia



Leyenda

Delimitaciones de la cuenca hidrográfica

CEDEX Vectorial Raster

Dimensión fractal

Máxima: 1.601825

Mínima: 1

Figura 11.–Mapa de la “dimensión fractal del relieve” en le cuenca del río Bullaque y su entorno, calculada sobre base a escala 1:50.000.

–Fractal dimensions of landforms the Bullaque river basin and its immediate surroundings, calculated at a 1:50,000 scale.

una ordenación integral centrada en cambio en desenmarañar la complejidad del sistema socio-ambiental (GALLENT *et al.*, 2008), esta disciplina ha ido perdiendo paulatinamente su peso específico en el seno de las estrategias de planificación.

En la misma situación que la Geomorfología Regional, se encuentran otras ciencias taxonómicas clásicas que no han sabido adoptar los principios de complejidad e incertidumbre inherentes al nuevo paradigma socio-ambiental (FOLCH, 1999).

Para que los resultados sean flexibles y adaptables a la situación concreta de cada territorio (GÓMEZ MENDOZA, 2001), esos nuevos componentes metodológicos deben tenerse en cuenta cuando se analizan sus capacidades, limitaciones, potencialidades y riesgos con el fin de implementar actuaciones y programas sobre el mismo

A la hora de analizar la incertidumbre, resultan especialmente útiles las herramientas relacionadas con los TIG (CHUVIECO *et al.*, 2005) y los conceptos desarrollados a partir del auge de la Ecología del Paisaje en los años 80 y 90 del siglo pasado (FORMAN, 1995).

La aplicación de estos procedimientos y metodologías de trabajo debe llevar a unos diseños de planificación territorial más abiertos, ya que el análisis del medio físico y del paisaje se plantea desde perspectivas más rigurosas al tener en cuenta su naturaleza probabilística.

La validez de los postulados anteriores se ensayó sobre la cuenca del río Bullaque. Para ello se diseñó una estrategia de trabajo que se pretendía fuera extensible al conjunto del taxón territorial al que pertenece la mencionada “región-plan”, y que se contrastó científicamente mediante la aplicación de un método hipotético-deductivo con base en el “falsacionismo popperiano”.

La estrategia propuesta permitió probar la eficiencia de una serie de parámetros morfométricos complejos, que se han utilizado para identificar y contrastar el nivel de incertidumbre inherente a los análisis más clásicos utilizados en Geomorfología Regional (MUÑOZ-ROJAS *et al.*, 2008).

Entre los parámetros complejos que se han ensayado, se encuentran la dimensión fractal de las formas del terreno y las metodologías difusas (*fuzzy*) de identificación y delimitación de formas básicas del terreno y de unidades fisiográficas a escala regional y sub-regional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto “Procesos Geomorfológicos activos en el entorno del Parque Nacional de Cabañeros

(PREG07-015)”, financiado por la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, a la cual agradecemos su colaboración. También queremos agradecer la labor de los revisores, cuyas indicaciones han contribuido a mejorar el trabajo.

Recibido el día 18 de mayo de 2009

Aceptado el día 15 de julio de 2009

BIBLIOGRAFÍA

- ARROYO, C. 2007. *Desarrollo rural sostenible en la UE*. 310 págs. MAPYA. Madrid.
- ARRELL, K, FISHER, P.F., TATE, N.J. & BASTIN, L. 2007. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the geomorphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. *Computers & Geosciences*, **34** (2): 286-304.
- BRABYN, L. 1998. Classification of macro landforms using GIS. In: P. FIRNS, Ed. *SIRC 98*. The 10th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre University of Otago, Dunedin, Nueva Zelanda, 16-19 Noviembre 1998.
- BUREL, F. & BAUDRY, F. 2002. *Ecología del Paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. 353 págs. Mundi-Prensa. Madrid.
- CARRASCO, R.M. 1999. *Geomorfología del Valle del Jerte. Las líneas maestras del paisaje*. 246 págs. Universidad de Extremadura. Cáceres.
- CENDRERO, A., SAIZ, J. & DÍAZ DE TERÁN J.R. 1976. A technique for the definition of environmental geologic units and for evaluating their environmental value. *Landscape Planning*, **3**: 35-66.
- CENDRERO, A., FRANCÉS, E. & DÍAZ DE TERÁN, J.R. 1992. Geoenvironmental units as a basis for assessment, regulation and management of the earth's surface. In: A. CENDRERO, G. LÜTTIG & F. CH. WOLFF, Eds., *Planning the use of the Earth's surface*. págs. 199-234. Springer Verlag, Berlin-N. York.
- COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C. 1990. *Geomorphology in environmental management: An introduction*. 410 págs. Clarendon Press. Oxford.
- CHUVIECO, E., BOSQUE, J., PONS, C., CONESA, C., SANTOS, J.M., GUTIÉRREZ PUEBLA, J., SALADO, M.J., MARTÍN, M.P., DE LA RIVA, J., OJEDA, J. & PRADOS, M.J. 2005. ¿Son las tecnologías de la Información Geográfica (TIG) parte del núcleo de la Geografía? *Boletín de la Asociación Española de Geógrafos*, **40**: 35-55.
- DAVIS, T.J. & KELLER, C.P. 1997. Modelling and visualizing multiple spatial uncertainties. *Computers & Geosciences*, **23**(4): 397-408.
- DÍAZ DE TERÁN, J.R. 1978. *Estudio geológico-ambiental de la franja costera Unquera-Castro Urdiales (Cantabria) y establecimiento de bases para su ordenación territorial*. 769 págs. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. Oviedo.
- DÍAZ PINEDA, F. 2000. Espacio y tramas de funcionamiento en el paisaje Mediterráneo. In: M. MOREY & R. MONTOYA, Eds., *El paisaje y el hombre: valoración y conservación del paisaje natural, rural y urbano*. págs., 35-37. OAPN. Madrid.
- FARINOS DASÍ, J. 2001. Reformulación y necesidad de una nueva Geografía Regional flexible. *Boletín de la AGE*, **32**: 53-71.

- FERIA TORIBIO, J.M. & CAMARILLO NARANJO, J.M. 1999. *Bases Conceptuales e Instrumentales para la Adecuación y Mejora del Sistema de Referencia Espacial de la Estadística Pública*. 127 págs. Informes, Estudios, Trabajos y Dictámenes de la Universidad de Sevilla. Sevilla.
- FOLCH, R. 1999. *Diccionario de socioecología*. 332 págs. Planeta. Barcelona.
- FORMAN, R. 1995. *Land Mosaics. The Ecology of Landscapes and Regions*. 656 págs. Cambridge University Press. Cambridge (R.U.).
- GALLEN, N., JUNTU, M., KIDD, S & SHAW, D. 2008. *Introduction to Rural Planning*. 364 págs. Routledge. Londres (R.U.).
- GARCÍA ABRIL, A., MARTÍNEZ DE ANGUITA P., MARTÍN, M.A. & ROMERO CALCACERRA, R. 2006. Introducción y Conceptos Previos. In: P. MARTÍNEZ DE ANGUITA, Coord., *Planificación Física y ordenación del territorio*. págs. 29-48. Dykinson S.L. Madrid.
- GARCÍA NOVO, F. 2007. Los Paisajes Europeos en una Cultura Tecnológica. In: J.L. RUBIO, Coord., *El Paisaje Mediterráneo: Opciones de Multifuncionalidad*. págs. 22-39. Fundación Santander Central Hispano. Valencia.
- GÓMEZ MENDOZA, J. 2001. Un mundo de regiones: Geografía regional de geometría variable. *Boletín de la AGE*, **32**:15-33.
- GÓMEZ OREA, D. Dir. 1975. *Plan Especial de Protección de Medio Físico de la provincia de Madrid*. 129, págs. COPLACO e ICONA. Madrid.
- 2000. *Ordenación Territorial*. 704 págs. Mundi Prensa y Ed. Agrícola Española. Madrid.
- 2002. *Evaluación de Impacto Ambiental: Un Instrumento Preventivo para la Gestión Ambiental*. 701 págs. Mundi Prensa y Ed. Agrícola Española. Madrid.
- GÓMEZ DELGADO, M. & BOSQUE SENDRA, J. 2004. Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *GeoFocus*, **4**:179-208.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ F. 1981. *Ecología y paisaje*. 250 págs. Blume. Madrid.
- 1985. *Invitación a la Ecología Humana. La adaptación afectiva al entorno*. 159 págs. Técno. Madrid.
- GONZÁLEZ CÁRDENAS, E. & GONSÁLVEZ REY, R.U. 2004. Nuevas aportaciones al conocimiento del hidrovulcanismo en el Campo de Calatrava (España) In: G. BENITO & A. Díez HERRERO, Eds., *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*. págs. 71-81. Sociedad Española de Geomorfología (SEG). Madrid.
- GREGORY, K.J. 2000. *The changing nature of physical geography*. 384 págs. Hodder Arnold Publishers. London (R.U.).
- HEISSEMBERG, W. 1927. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, **43**:172-198.
- HARPER, C. 2004. *Environment and Society: Human Perspectives on Environmental Issues*. 496 págs. Pearson Education. Upper Saddle River, New Jersey.
- HERNÁNDEZ PACHECO, E. 1934. *Síntesis fisiográfica y geológica de España*. 584 págs. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales, nº 38. Madrid.
- 1955. *Fisiografía del Solar Hispano*. 665 págs. Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie de Ciencias Naturales, nº 16, volumen 1. Madrid.
- 1956. *Fisiografía del Solar Hispano*. 793 págs. Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie de Ciencias Naturales, nº 16, volumen 2. Madrid.
- HUBBARD, P., BARTLEY, B., KITCHEN, R. & FULLARD, D. 2005. *Thinking Geographically: Space, Theory and Contemporary Human Geography*. 320 págs. Continuum International Publishing Group Ltd. Londres (R.U.).
- KUHN, T.S. 1962. *The structure of scientific revolutions*. 147 págs. University of Chicago Press, Chicago.
- LAKATOS, I. 1993. *La metodología de los Programas de investigación científica*. 469 págs. Alianza. Madrid.
- LÓPEZ ARIAS, M. 2000. Aplicación de la geometría fractal al análisis del paisaje. In: M. MOREY & R. MONTOYA, Eds., *El paisaje y el hombre: valoración y conservación del paisaje natural, rural y urbano*. págs. 143-277. OAPN. Madrid.
- LÓPEZ-RIDAURA, S., MASERA, O.R. & ASTIER, M. 2002. Evaluating the Sustainability of Complex Socio-Environmental Systems. *The Mesmis Framework. Ecological Indicators*, **35**:1-14.
- MANDELBROT, B. 1982. *The fractal geometry of nature*. 417 págs. W.H. Freeman & Co. New York.
- MÁRQUEZ PÉREZ, J. 2004. *Modelos Digitales de Elevaciones (Mde's), Métodos de Interpolación y Parámetros Morfológicos del Relieve: Introducción al Análisis de Sus Relaciones a Partir de Información Extraída de Cartografía*. 678 págs. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- MARTÍ, B. 2007. Las condiciones naturales, rasgos actuales del paisaje Mediterráneo. In: J.L. RUBIO, Coord. *El Paisaje Mediterráneo: Opciones de Multifuncionalidad*. págs. 45-57. Fundación Santander Central Hispano, Valencia.
- MARTÍN-DUQUE, J.F. 1997. *La Geomorfología en los estudios del medio físico y la planificación territorial. Aplicación a un sector del Sistema Central*. 489 págs. Tesis Doctoral. Facultad de CC. Geológicas (UCM). Madrid.
- MARTÍN-DUQUE, J.F.; PEDRAZA, J.; SANZ, M.A.; BODOQUE, J.M.; GEODFREY, A.E.; DíEZ, A. & CARRASCO, R.M. 2002. A Landform Classification for Land-use planning in Developed Areas. An Example in Segovia Province (Central Spain). *Journal of Environmental Management*, **31**: 488-498.
- MARTÍNEZ DE ANGUITA P. 2006. Presentación. In: P. MARTÍNEZ DE ANGUITA, Coord., *Planificación Física y ordenación del territorio*. págs. 1-2. Dykinson, S.L. Madrid.
- MARSH, W. & GROSSA, J. 2004. *Environmental Geography: Science, land use and Earth systems*. 512 págs. John Wiley & Sons Inc. New York.
- McHARG, I. 1969. *Design with Nature*. 208 págs. American Museum of Natural History. Washington D.C.
- MITCHELL, C.W. 1973. An appraisal of hierarchy of Land Units. *Geoforum* **7**: 69-79.
- MUÑOZ-ROJAS, J. 2006. *La información territorial en la implementación de un SIG. Aplicación a la cuenca del río Bullaque. Metodología y Limitaciones*. 102 págs. Trabajo-Proyecto del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Departamento de Geodinámica, Facultad de CC. Geológicas (UCM). Madrid.
- 2007. El papel de los riesgos geomorfológicos en la ordenación del territorio. In: M.A. TROITINO VINUESA, & L. PÉREZ MONEO, Eds., *V Congreso Internacional de Ordenación del Territorio*. págs. 74-82. FUNDICOT. Málaga.
- MUÑOZ-ROJAS J., CARRASCO, R.M. & PEDRAZA, J. 2006a. Propuesta de elaboración y análisis de unidades territoriales homogéneas (unidades de paisaje) mediante técnicas SIG. Aplicación a la cuenca hidrográfica del Río Bullaque (Montes de Ciudad Real-Toledo). In: C.A. BRAGAÇA DOS SANTOS, Coord., *Actas del V Congreso*

- Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. págs. 38-39. Ed. Foro Nueva Cultura del Agua. Faro (Portugal).
- 2006b. La información territorial en la implementación de un SIG. Aplicación a la cuenca del río Bullaque (Montes de Ciudad Real-Toledo). Metodología y limitaciones. In: M.T. CAMACHO OLMEDO, J.A. CAÑETE PÉREZ & J.J. LARA VALLE, Eds., *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías de la información geográfica: Actas del XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. págs. 1075-1092. Universidad de Granada, Granada.
 - 2007. La información cartográfica en el análisis geomorfológico de la cuenca del río Bullaque (Montes de Ciudad Real). In: P.G. SILVA & J. LARIO, Eds., *Contribuciones al estudio del periodo Cuaternario Ibérico*. págs. 231-233. AEQUA-AEG. Ávila.
- MUÑOZ-ROJAS, J., CARRASCO, R.M., PEDRAZA, J. & TAPIADOR, J. 2008. Diseño de técnicas SIG basadas en la incertidumbre espacial: ensayo de aplicabilidad en el análisis geomorfológico regional de la cuenca del río Bullaque (Ciudad Real-Toledo). In: J. BENAVENTE & F.J. GRACIA, Eds., *Trabajos de Geomorfología en España (2006-2008)*. págs. 497-501. Universidad de Cádiz-AEG. Cádiz.
- OJEDA RIVERA, J.F. 1990. Naturaleza y desarrollo: cambios en la consideración política de lo ambiental durante la segunda mitad del siglo XX. *Papeles de Geografía*, **30**:103-118.
- ORTEGA VALCÁRCEL, J. 2000. *Los horizontes de la Geografía*. 604 págs. Ariel, Serie Geografía. Barcelona.
- PASCUAL, J.A. 2007. Pautas de transformación del paisaje tradicional Mediterráneo. In: J.L. RUBIO, Coord. *El Paisaje Mediterráneo: Opciones de Multifuncionalidad*. págs. 70-80. Fundación Santander Central Hispano. Valencia.
- PEDRAZA GILSANZ, J. 1982. Geomorfología y Geología: consideraciones epistemológicas. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, **80**(1-4):39-48.
- 2000. El medio físico en la planificación y ordenación territorial. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*. **96**(1-2): 5-18.
 - 2005. Impacto de la actividad humana sobre los recursos y procesos geológicos. In: J.L. TELLERÍA, Ed., *El impacto del hombre sobre el planeta*. págs. 47-88. Editorial Complutense (UCM). Madrid.
- PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M., MARTÍN-DUQUE, J.F., Díez, A., SANZ, M.A. & MARTÍN-RIDAURA, A. 1996. *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. 414 págs. Rueda. Madrid.
- PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M., MARTÍN-DUQUE, J.F. & SANZ, M.A. 2006. Geomorfología. In: M.P. ARAMBURU & R. ESCRIBANO, Coords., *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Capítulo III, págs. 97-128. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- PELLEGRINI, G.J. 1996. *Terrain shape classification of digital elevation models using eigenvectors and Fourier transforms*. 399 págs. PhD Memory. State University of New York. Collection of Environmental Science & Forestry. Albany (EEUU).
- POPPER, K. 1934. *The logic of scientific discovery*. 278 págs. Hutchinson. London.
- RAMOS FERNÁNDEZ, A. Coord. 1979. *Planificación Física y ecología; modelos y métodos*. 197 págs. Emesa. Madrid.
- RAMOS FERNÁNDEZ, A. & FERNÁNDEZ GALIANO, E. 1995. Ramón Margalef: El uso exagerado de la ecología. *Nueva revista de política, cultura y arte*, **40**:15-24.
- SCHMIDT, J. & HEWITT, A. 2004. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, **121**: 243-256.
- SERRES, M. & AUTHIER, M. 1995. *A History of Scientific Thought: Elements for a History of the History of Science*. 768 págs. Blackwell Publishers. London.
- SKINNER, B.J.; PORTER, S.C. & BOTKIN, D.B. 1999. *The Blue Planet. An Introduction to Earth System Science*. 684 págs. John Wiley & Sons. New York.
- SMELSER, N.J. & BALTER, P.B. 2001. *International Encyclopedia of Social & Behavioral Sciences. Vol III*. 1750 págs. Pergamon Press. New York.
- TURNER, A.G.D. 2007. *Geomorphometrics: Ideas for Generation and Use*. 37 págs. CCG Working Papers. University of Leeds School of Geography. Leeds, R.U.