

Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve

Geomorphometric classification of the Mexican relief: a morphographic approach by contour density and relief energy

José R. Hernández Santana,* José L. Pérez Damián,** Fernando Rosete Vergés,** Mariano Villalobos Delgado,***
Ana P. Méndez Linares* y Elda Navarro Salas**

Recibido: 02/09/2016. Aceptado en versión final: 14/03/2017. Publicado en línea (versión e-print): 15/04/2017

Resumen. En la actualidad los estudios geomorfométricos del relieve y su representación cartográfica digital constituyen una plataforma geomorfológica esencial para la delimitación de unidades sintéticas naturales, indispensables para la organización territorial y para las investigaciones aplicadas a la optimización del uso agrícola de suelo, la microlocalización de asentamientos humanos, la designación de programas forestales e, inclusive, para los planes estratégicos militares, entre muchas utilidades socioproductivas. En este sentido, el presente trabajo persigue precisar los métodos y las interpretaciones geomorfológicas sobre la morfografía y la energía del relieve mexicano, considerando para ello dos cálculos por unidad de área: densidad de curvas de nivel (km/km^2) como base morfográfica, y diferencia máxima de alturas (m/km^2) como base morfométrica, con apoyo en los software SIG ArcView, ArcGis y ArcInfo. Las etapas del levantamiento cartográfico de las unidades geomorfométricas del relieve mexicano fueron: 1) construcción del mapa morfográfico: a) cálculo de la densidad de curvas de nivel, b) análisis y reclasificación de datos, c) generalización espacial por área mínima cartografiable y d) suavizado de

límites geográficos; 2) elaboración de la energía del relieve: a) construcción del MDE, b) cálculo de la energía del relieve y c) reclasificación de datos, y 3) obtención del mapa de las unidades geomorfométricas del relieve: a) superposición de los mapas morfográfico y de energía del relieve, b) estadística espacial y c) asignación por contorno morfográfico de las dos clases de energía del relieve predominantes. Finalmente, la metodología arrojó resultados bastante precisos y coherentes entre las realidades matemático-estadística y geomorfológica del relieve.

Palabras clave: unidades geomorfométricas, geomorfología, México

Abstract. At present the geomorphometric studies of relief and the digital mapping are an essential geomorphological platform for delimitation of natural synthetic units, so indispensable to the territorial organization, and others applied researches as the optimization of agricultural land use, microlocalization of settlement human, designation of

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Delegación Coyoacán, México City. santana@igg.unam.mx, patymil@igg.unam.mx

** Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, SEMARNAT, Periférico 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Delegación Coyoacán, C.P. 04530, México City. jldamian94@yahoo.com.mx farosete@yahoo.com.mx geonavarro@gmail.com

*** Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI), Balderas 71, Col. Centro, C.P. 06040, Delegación Cuauhtémoc, México City. mariano.villalobos@inegi.org.mx

forest programs and even for military strategic plans, among many social and productive utilities. Thus, this article aims to provide detailed information on analytical geomorphological methods and interpretations of morphography and energy for Mexico's relief, considering two calculations according to unit area: density contour (km/km^2) and maximum difference of heights (m/km^2) - both relief indices -, with the support of GIS ArcView, ArcGIS, and ArcInfo software. A review of existing national atlases revealed that not all countries have morphometric data on their reliefs. Indeed, mapping of this type was only found, in chronological order, in the National Atlas of Cuba (1970), the Atlas of the Slovak Socialist Republic (Slovak Cartography (1983), the National Atlas of Hungary (Geographic Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences (1989), the New National Atlas of Cuba (1989), and the National Atlas of Mexico (1990), all on a small scale. In other national atlases, there are only hypsometric and slope steepness maps. The stages for mapping the geomorphometric units of Mexico's relief were: (1) Construction of the morphographic map: a) Calculation of density contours, b) Data analysis and reclassification, c) Spatial generalization by minimum mappable area, and d) Smoothing of geographic limits; (2) Obtaining a relief's energy map: a) Construction of the Digital Elevation Model (DEM), b) Calculations for the relief's energy map, c) Data reclassification, and d) Spatial generalization; (3) Production of a map of the relief's geomorphometric units: a) Overlaying of the morphographic and relief's energy maps, b) Spatial statistics, and c) Map of geomorphometric relief units; and 4) Definition, according to morphographic contour, of the two predominant classes of the relief's energy. The morphographic map (density of contours in km/km^2) shows nine range classes: less than 1.0, from 1.0 to 2.0, from 2.1 to 3, from 3.1 to 4, from 4.1 to 5, from 5.1 to 6, from 6.1 to 7, from 7.1 to 8.0, and more than 8.0. On the other hand, the map of the relief's energy has 9 ranges (m/km^2): less than 10.0, from 10.1 to 20.0, from 20.1 to 50.0, from 50.1 to 100.0, from 100.1 to 200.0, from 200.1 to 300.0, from 300.1 to 400.0, from 400.1 to 500.0, and over 500.0. An analysis of this country's territory reveals that very highly dissected mountainous relief, with dissection values ranging

from 501 to 1 300 m/km^2 , evidences a monolithic location pattern associated with major breakups due to erosion in the central portion of the Sierra Madre Occidental and, in a more isolated way, in its southern portion; in the central sector of the Sierra Madre del Sur in the State of Guerrero; in the sierras of Miahuatlán and Juárez, in the State of Oaxaca; and in very scattered sectors of the southwestern part of the Sierra Madre de Chiapas and the Sierra Madre Oriental. These orogenic regions have land areas characterized by greater ascending widths and intensities in terms of neotectonic movements responsible for the formation of Mexico's modern relief. In contrast, morphometric units belonging to the vertical dissection category from 21 to 50 m/km^2 exhibit moderately dissected, hilly relief typical of high and mid plains formed by a weaker neotectonic process. Lastly, morphometric units with dissection values between 0 and 20 m/km^2 stretch along the plains of the coastal states on the Gulf of Mexico, including karstified plains in the Yucatán Peninsula. Units in this category also stretch along the coastal plains of the Baja California Peninsula, the states of Sonora and Sinaloa, and the Pacific Coast in the State of Chiapas. They can also be found in isolated patches on the coastal plains of the Sierra Madre del Sur, on the plains of the Central Mexican Plateau, and along depressed areas of the Trans-Mexican Neovolcanic Belt, where they occupy countless graben depressions, as well as among volcanic edifices throughout the region. The present methodology for determining geomorphometric unities in Mexico's relief at a scale of 1:250 000, supported by a GIS platform, using density contours as the morphographic parameter for the country's relief, provided rather precise results consistent with the relief's mathematical-statistical and geomorphological realities. The cartographic expression at a 1:250 000 scale included 122 map sheets of Mexico representing several different levels of data, as morphographical, morphometric (relief's energy) and topographic, all of great significance for the preparation of other issues geomorphological mapping.

Keywords: Geomorphometric unities, geomorphology, Mexico

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo socioeconómico de un país, la clasificación de su relieve representa uno de los primeros pasos para la definición y la delimitación de sus unidades sintéticas naturales o de gestión ambiental, indispensables para el establecimiento de modelos de ordenamiento ecológico territorial.

Por otra parte, contribuyen a otras investigaciones de tipo geomorfológico, edafológico, geobotánico, paisajístico, todas dentro del campo físico-geográfico, e incluso para estudios sociales en el ámbito rural, agrícolas de eficiencia produc-

tiva, de conservación de suelos y vegetación, para evaluaciones de factibilidad para la construcción de infraestructuras hidráulicas, de soporte para los cálculos ingenieriles en el trazado de viales y para el establecimiento de planes estratégicos de desplazamiento de tropas y equipamientos militares, entre múltiples aplicaciones. Es por ello, que la integración de la cartografía morfológica (densidad de curvas de nivel, en km/km^2) y la morfométrica (energía o amplitud del relieve, en m/km^2) son de relevante utilidad para una adecuada planeación ecológica y productiva del territorio nacional.

Como antecedente original de las investigaciones morfométricas en México destacan los trabajos de Lugo-Hubp (1988, 1992, 2011), donde se define la energía o amplitud del relieve como la diferencia máxima de alturas, en metros por unidad de área, y se presenta un fragmento de la región sureste del país, que incluye sectores del Golfo de México y del océano Pacífico (Lugo-Hubp, 1992), dado que el estudio abarcó el relieve emergido y el submarino. Posteriormente, aparecieron los primeros mapas del territorio mexicano, a escala 1:4 000 000 (Lugo-Hubp *et al.*, 1990a, 1990b), en el *Atlas Nacional de México*, los que han contribuido a numerosos trabajos regionales y a la docencia universitaria.

El objetivo general del trabajo fue generar la cartografía digital de las unidades geomorfológicas del relieve (UMR) mexicano, a escala 1:250 000 (122 hojas cartográficas del territorio nacional), apoyado en las herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG). El propósito es contar con un producto cartográfico apegado a la manifestación espacial del relieve nacional, útil para apoyar la elaboración de los programas de ordenamiento ecológico y para múltiples aplicaciones a la vida social y productiva del país, así como para establecer, de manera general dada la escala, las regularidades en cada categoría geomorfológica (montañas, lomeríos y llanuras, y sus subdivisiones), indispensables para la clasificación morfogenética y morfoestructural del relieve.

ÁREA DE ESTUDIO

Localización geográfica

El territorio nacional mexicano, ubicado en el extremo suroccidental de la placa Norteamericana, posee una extensión aproximada de 1 964 375 km² (INEGI, 2008). Se localiza entre los 14° 32' 27" y los 32° 43' 06" de latitud norte, y entre los 86° 42' 36" y 118° 22' 00" de longitud oeste.

Características estructuro-geomorfológicas del relieve

La morfoestructura de su relieve es de tipo transicional entre placas continental y oceánicas, conso-

lidada por fragmentos de cratón proterozoico y de bloques alóctonos fanerozoicos, acrecionados en zonas de subducción y de transformación (Hernández Santana, Lugo Hubp y Ortíz Pérez, 2007). Su constitución geológica, desde el Precámbrico hasta el presente, está integrada por complejos metamórficos, intrusivos, volcánicos, vulcano-sedimentarios, sedimentarios plegados y poligenéticos no consolidados. La evolución geotectónica ha determinado grandes cordilleras montañosas (Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y Sierra Madre del Sur), altiplanos continentales centrales, un eje neovolcánico transmexicano, plataformas neotectónicas (Morelos y Yucatán) y cuencas transgresivas litorales, estas últimas tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico. Desde el punto de vista fisiográfico predominan las llanuras, seguidas por las montañas y los lomeríos.

MARCO TEÓRICO

A nivel mundial, uno de los primeros intentos en el desarrollo de los métodos cuantitativos en la ciencia geomorfológica, fue realizado por Horton (1945), –uno de los precursores del estudio cuantitativo de las redes fluviales–, mediante el establecimiento de un modelo de órdenes. Propuso diferentes índices, como orden y relación de longitud de corriente, densidad de drenaje y relación de bifurcación, basados, a su vez, en las leyes del número de las corrientes fluviales y de las longitudes de los arroyos.

Dentro de las características morfométricas sugeridas para el estudio morfométrico de una cuenca (Horton, 1932) se encuentran el factor de forma, la compacidad, la altitud media, la pendiente general de la cuenca, la pendiente media, la densidad de drenaje, el número de corrientes, la pendiente de las corrientes, y la dirección y longitud de la esorrentía superficial.

Posteriormente, Strahler (1952, 1957, 1964) modifica y propone un nuevo modelo de jerarquización de órdenes fluviales. En sus concepciones distingue los aspectos lineales de los sistemas del cauce, los aspectos superficiales de la cuenca de drenaje y los aspectos de relieve, tanto de la cuenca como de los canales (Romero y López, 1987).

Por otra parte, Strahler (1954) destaca el método hipsométrico para el estudio morfométrico de las cuencas fluviales y el cálculo de la curva hipsométrica y sus porcentajes dentro de las mismas; los primeros aportes en esta dirección provinieron de los trabajos de Langbein (1947).

Todos estas contribuciones iniciales en el análisis cuantitativo fluvial y de cuencas durante el siglo XX permitieron desarrollar y proponer nuevos índices sobre los rasgos del relieve, lo que dio lugar a la aparición de los métodos morfométricos para el estudio cuantitativo de la energía del relieve, la profundidad de disección erosiva, la densidad horizontal de las corrientes fluviales y muchos otros, dirigidos también al análisis estructuro-tectónico de la corteza terrestre y de la geodinámica endógena del relieve, así como a conocer las intensidades y tendencias de la geodinámica reciente (Jain, 1980), y a la prospección gaso-petrolífera local (Filosov, 1950).

Como se sabe, el concepto de profundidad de disección del relieve, también conocido como energía del relieve en México, se define como la amplitud de las variaciones altimétricas, en metros y por unidad de área (Spiridonov, 1974, 1982; García-Ariza y Lugo-Hubp, 2003; Lugo-Hubp, 2011). Para ello se emplea el mapa topográfico, preferentemente a escala detallada.

Los cálculos tradicionales del índice morfométrico de energía o amplitud del relieve establecían un sistema de cuadrículas de idéntica superficie, dentro de las cuales se determinaba la máxima diferencia de alturas y se reflejaba su valor para cada una de ellas. Posteriormente, el valor de cada cuadrícula se insertaba en su centro de gravedad y, a partir de las regularidades planimétricas o de proyección del relieve, se trazaban las isolíneas de idéntica energía, siempre respetando los rasgos morfográficos del mismo.

Dada la gran extensión de México, Lugo-Hubp (1992) abordó el estudio de la energía o amplitud del relieve tomando unidades de 12 mm² aproximadamente, equivalentes a un mapa topográfico a escala 1:50 000. Con ello alcanzó grandes valores de la energía del relieve, a partir del relieve emergido y sumergido. El espectro de clasificación reflejó los intervalos siguientes: menos de 10, 10-20, 20-50,

50-100, 100-300, 300-500, 500-1000 y mayores.

Actualmente, con el auge del desarrollo tecnológico moderno, fundamentalmente en materia de SIG, el cálculo de la energía del relieve y otros índices se ejecuta con rapidez y precisión, reduciendo en gran medida los costos de la ejecución en gabinete, así como la revisión geomorfológica en condiciones de campo.

A nivel mundial no todos los atlas muestran algunos índices de la cartografía geomorfológica del relieve nacional. Tales expresiones cartográficas fueron encontradas únicamente en el *Atlas Nacional de Cuba* (Academias de Ciencias de Cuba y Academia de Ciencias de la URSS, 1970), en el *Atlas de la República Socialista de Eslovaquia* (Slovak Cartography, 1983), en el *Atlas Nacional de Hungría* (Geographic Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1989), en el *Nuevo Atlas Nacional de Cuba* (Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba, 1989) y en el *Atlas Nacional de México* (Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, 1990), todos a escalas inferiores a 1:1 000 000. Esta situación nos refiere el carácter especializado del cálculo y del procesamiento de tales índices del relieve.

A pesar de que estos estudios no son frecuentes, en dichas obras los intervalos establecidos por varios autores para la disección vertical (Tabla 1) reflejan las características morfográficas y morfológicas del relieve.

En la literatura internacional reciente se encuentran múltiples enfoques para el empleo del análisis geomorfológico, no sólo en la evaluación del fenómeno local o regional, sino en la evaluación geomórfica de otros procesos y geoformas resultantes, como los escombros de avalanchas volcánicas (Salinas *et al.*, 2010); en el análisis de los aspectos geomorfológicos de un territorio, usando parametrización morfométrica y redes neuronales artificiales (Ehsani y Quiel, 2008); en el establecimiento de clasificaciones geomorfológicas de relieve de energía moderada a alta (Giles y Franklin, 1998); en la interpretación multifactorial del paisaje para la determinación de la relación pendiente-área, relación curvatura-área y área de distribución acumulativa del drenaje (Yetemen, Istanbuluoglu y

Tabla 1. Intervalos de profundidad de disección para mapas morfométricos de Rusia, México, Cuba y Hungría.

Spiridonov (1974) Prof. disección (ilustra a E. M. Nikolaevskaia, 1966) Esc.1:200 000	Lilienberg (1970) Disección vertical Atlas Nacional de Cuba (*) Esc. 1:2 500 000	Díaz-Díaz (1989) Disección vertical, Nuevo Atlas Nacional de Cuba Esc. 1:2 000 000	Sciences Academy of Hungary (1989) Disección vertical, Atlas Nacional de Hungría (**) Esc. 1:1 000 000	Lugo-Hubp (1990) Atlas Nacional de México, profundidad de disección Esc. 1:8 000 000	Priego <i>et al.</i> (2003) Disección vertical Esc. 1:250 000
Menos de 5	0-10	Menos de 10	0-5	0	0-2.5
5-10	10-20	10-20	0-10	Menos de 10	2.5-5
10-25	20-50	20-50	2-10	10-20	5-10
25-50	50-100	50-100	0-25	20-50	10-15
50-100	100-200	100-200	2-25	50-100	15-20
100-200	Más de 200	200-300	2-50	100-200	20-30
Más de 200		300-400	0-50	200-300	30-40
		400-500	5-50	300-500	40-60
		500-750	10-150	500-700	60-80
		750-1000	25-100	700-1000	80-100
		1000-1500	10-200	1000-1300	100-250
		Más de 1500	50-200	1300-1600	250-500
			100-300	10-20 Karst	500-1000
			150-300	20-50 Karst	
			150-350		
			150-200		

* Muy generalizados los niveles montañosos.

** Como se puede apreciar no existe una integración numérica; se presentan repeticiones de intervalos sólo porque responden a una geoforma específica.

Fuente: elaboración propia.

Vivoni, 2010); en el análisis de las interrelaciones entre la microtopografía y los rangos erosivos de corto y largo período en plataformas costeras, sobre litologías diferenciadas (Inkpen, Stephenson, Kirk, Hemmingsen, y Hemmingsen, 2010); en las estimaciones de la tasa de transporte de sedimentos fluviales, a partir de mediciones de los cambios morfológicos de las geoformas del microrrelieve fluvial (Brasington, Rumsby y Langham, 2003); en el análisis morfométrico de geoformas erosivas, como barrancos y cárcavas, en territorios boscosos, con incendios continuos, así como a sus flujos de escombros (Gabet y Bookter, 2008; Kovanen y Sla-

ymaker, 2008); en el estudio morfológico de deformaciones tectónicas de morfoelementos, mediante el análisis de asimetrías morfométricas (Jamieson, Sinclair, Kirstein y Purves, 2004); en la búsqueda de evidencias de desplazamientos activos, a lo largo de fallas geológicas importantes (Dumont, Santana y Vilema, 2005), y en el análisis tridimensional del relieve, mediante programas computacionales en ambientes SIG (Parrot, Ochoa Tejeda y Lugo Hubp, 2008; Parrot, 2013), entre otros.

La morfología y la morfometría del relieve, independientemente de la dimensión y extensión de las geoformas, refleja la intensidad de los pro-

cesos genéticos de su formación, el papel de las deformaciones tectónicas de su yacencia, el grado de rugosidad de su expresión y los obstáculos que ofrece al desarrollo de actividades socioeconómicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La obtención del mapa de las unidades geomorfológicas del relieve mexicano, a escala 1:250 000, es un producto de la colaboración entre el Instituto Nacional de Ecología (hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), generado a partir del análisis espacial de dos de los índices geomorfológicos de relieve: la morfografía y la energía del relieve, apoyado en los software SIG ArcView, ArcGis y ArcInfo, a partir de la información topográfica digital del INEGI (1997), a escala 1:250 000.

Dado que a la escala 1:250 000 la equidistancia entre curvas de nivel es cada 100 m, se procesaron las curvas de nivel a escala 1:50 000, cuya equidistancia es de 20 m, para determinar con mayor precisión la expresión espacial de la energía del relieve de la zona costera de México, representada mayormente por llanuras planas, onduladas, colinosas y muy colinosas, cuyos valores de incisión erosiva alcanzan desde metros hasta decenas de metros. Sin este paso hubiese sido difícil desarrollar de manera automática el cálculo preciso, pues una interpolación de curvas de nivel, inferiores a 100 m, corregida por una rectificación de experto, indiscutiblemente hubiese introducido errores en su distribución y trazado espacial.

Con anterioridad, Priego y Pérez (2003) emprendieron el levantamiento de los tipos morfológicos del relieve, a escala 1:250 000, y la cartografía geomorfológica alcanzada mostró trece tipos geomorfológicos del relieve mexicano, diferenciados en siete tipos de llanuras, tres de lomeríos y tres de montañas, y adoptaron los criterios clasificativos de Sipirdonov (1974), aunque uno de los problemas esenciales fue la interpolación de curvas de nivel en las regiones costeras, incluso al

tratar de obtener una diferenciación de las llanuras sin un soporte adecuado y detallado de curvas de nivel para dichas zonas.

A diferencia de ello, el presente trabajo clasifica nueve tipos de unidades geomorfológicas para México (tres tipos de llanuras, una de transición de llanuras a lomeríos; una de lomeríos y cuatro de montañas), más ajustadas a la realidad geomorfológica de sus categorías (montañas, lomeríos y llanuras, y sus subdivisiones) y, por supuesto, de acuerdo con la precisión que brinda la escala 1:250 000.

La elaboración del mapa de unidades geomorfológicas del relieve mexicano, a escala 1:250 000, fue dividida en cuatro etapas fundamentales:

1. *Construcción del mapa de la morfografía del terreno*, a partir del cálculo de la densidad de curvas de nivel por unidad de área (km/km^2), de la siguiente forma:

- a) Cálculo de la densidad de curvas de nivel de la carta topográfica en formato vectorial, a escala 1:250 000. Se extrajo la totalidad de las curvas de nivel del territorio nacional. Con la cobertura resultante se calculó la densidad de curvas de nivel por unidad de área (km/km^2), obteniendo de esta forma una cobertura raster, con resolución de 80 m (congruente con la escala de trabajo), con los valores continuos de la densidad de curvas de nivel.
- b) Análisis y reclasificación de datos. Al vasto conjunto de valores continuos (millones de píxeles) de la densidad de curvas de nivel se le aplicó el análisis estadístico espacial de la desviación estándar, con el objeto de obtener aquellos rangos de valores que mejor representaran la manifestación espacial de los datos, de acuerdo con el insumo cartográfico que les dio origen. Esto requirió de varios ensayos de agrupación de valores y de número de rangos. Al final, el mapa quedó clasificado en los nueve rangos siguientes (expresados en km/km^2): menos de 1, de 1 a 2, de 2.001 a 3, de 3.001 a 4, de 4.001 a 5, de 5.001 a 6, de 6.001 a 7, de 7.001 a 8 y más de 8.

c) Generalización espacial, con el objeto de enfatizar el valor cognoscitivo del mapa raster recién clasificado. A este se le aplicó su generalización espacial por filtros de mayoría (con base en matriz o kernel, de 5 por 5 píxeles), que consistió en determinar el valor del píxel del centro (columna 3, renglón 3), eligiendo el valor de la moda estadística entre sus 24 píxeles vecinos, incluyendo el del píxel de referencia. Y por área mínima cartografiable, basada en identificar el conjunto de identidades geográficas menores a 1 km² de superficie (equivalentes a 4 mm² en el mapa a escala 1:250 000) y de asignarlas con sus similares contiguas, mayores a dicha superficie, para lo cual fue necesario transformar el mapa de raster a vector. El mapa vectorial quedó constituido por entidades geográficas con una superficie mayor a 1 km².

d) Suavizado o simplificación de límites geográficos: se realizó con el propósito de corregir la representación cuadrática de la información geográfica en formato raster, tratando que los límites de las entidades geográficas fueran lo más parecido a la realidad geomorfológica del territorio analizado. Para ello, se aplicó la operación SIG “generalize” para suavizar los límites de las entidades geográficas.

De esta forma, quedó constituido el mapa final de los contornos morfográficos del terreno (Figura 1), sobre el que más adelante se realizaría el vaciado de los datos, vía superposición espacial y por rangos de la energía del relieve correspondiente.

2. *Elaboración del mapa de la energía del relieve*, a partir del cálculo de la máxima diferencia de alturas por km², de la manera siguiente:

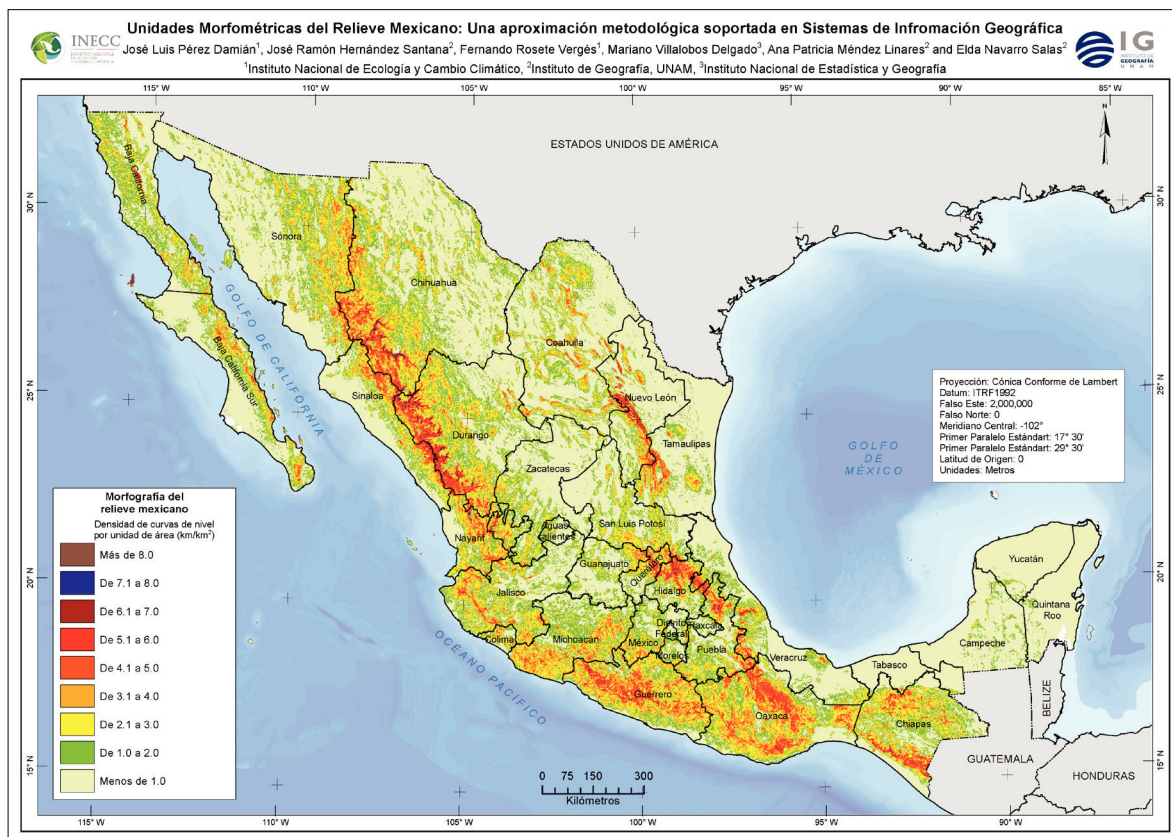


Figura 1. Morfografía, según la densidad de curvas de nivel.

- a) Construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE). Se obtuvo un mapa raster, con resolución de 100 m, a partir de la interpolación del conjunto nacional de curvas de nivel, con el propósito de reconocer la estructura numérica y continua que representa el comportamiento espacial del dato de altitud del terreno.
- b) Cálculo de la energía del relieve. A partir del MDE se obtuvo la diferencia altimétrica máxima por km^2 (equivalente a una matriz o kernel de 10 por 10 píxeles), consistente en la búsqueda espacial de los datos de la altura máxima y mínima por km^2 , y de restar al primero, el valor del segundo. De esta forma, se obtuvo el mapa raster con los valores continuos de la energía del relieve, expresado en m/km^2 .
- c) Reclasificación de datos. Se generaron a partir de los datos continuos de la energía del relieve, apoyados en los criterios de clasificación existentes y después de varios intentos de reclasificación. Fueron determinados los 9 rangos siguientes (expresados en m/km^2) que expresaron la diferenciación de la energía del relieve de México: menos de 10, de 10 a 20, de 20.1 a 50, de 50.1 a 100, de 100.1 a 200, de 200.1 a 300, de 300.1 a 400, de 400.1 a 500 y más de 500.
- d) Generalización espacial, con el propósito de rescatar los rasgos fundamentales del relieve, así como para reducir su complejidad (pulverización de datos). A este producto cartográfico también se le aplicó su generalización espacial, primero por filtros de mayoría (con base en matriz o kernel de 5 por 5 píxeles), y luego por área mínima cartografiable (de 250 000 m^2 de superficie o 2 mm^2 en el mapa). Este último paso requirió de la conversión de la cobertura raster a vector.

Así se construyó el mapa vectorial final de la energía del relieve (Figura 2), cuya superposición con el

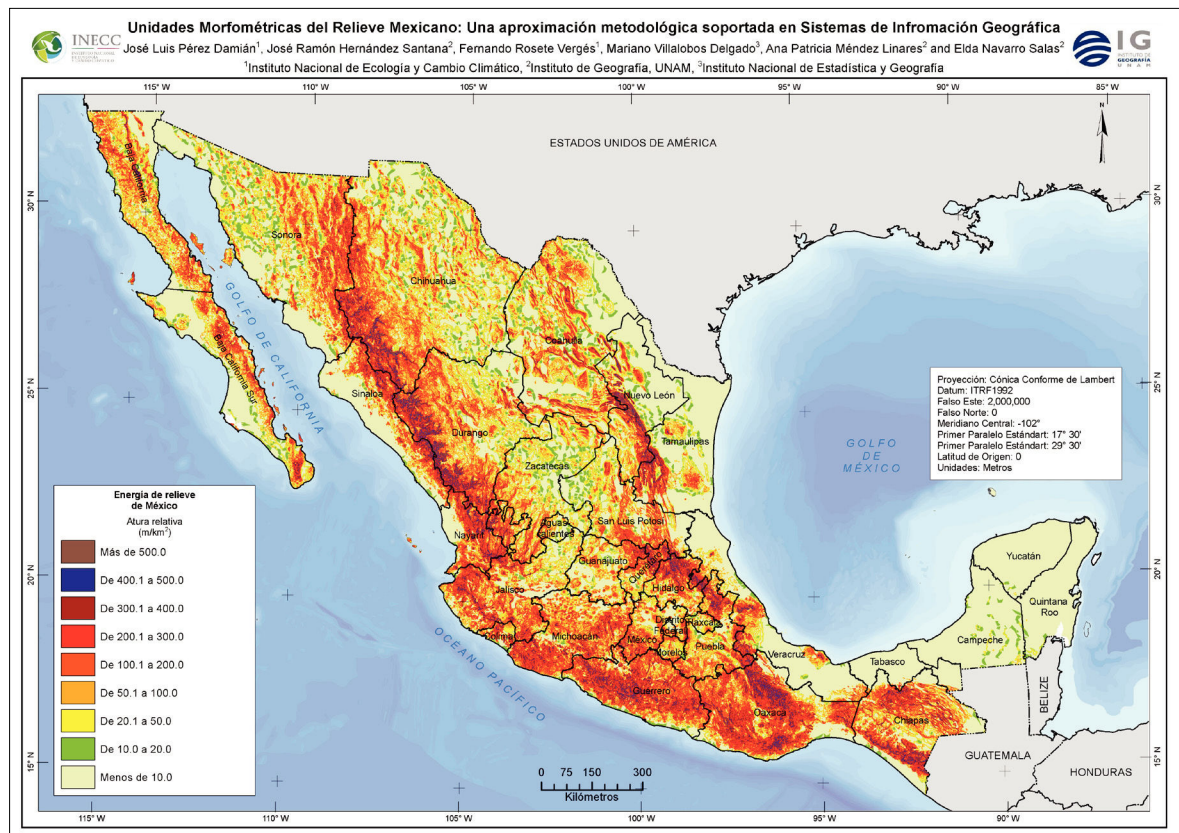


Figura 2. Energía del relieve, en m/km^2 .

mapa morfográfico permitió identificar las clases de energía del relieve por contorno morfográfico.

3. *Obtención del mapa de las unidades geomorfométricas del relieve.* Una vez obtenidos los dos productos cartográficos que le dan origen a este mapa se elaboró de la forma siguiente:

- Superposición de los mapas de la morfografía del terreno y el de la energía del relieve, lo que determinó un mapa con la suma geométrica de las entidades geográficas, así como la adición de los atributos de ambas. De esta forma fue posible reconocer la manifestación de la energía del relieve por contorno morfográfico.
- Análisis del comportamiento de la energía del relieve por contorno morfográfico con los atributos de la información geográfica obtenida. Se obtuvo con la formulación de una tabla de frecuencias, el comportamiento de las clases

de energía por contorno morfográfico, según su superficie ocupada (km^2).

- Mapa de unidades geomorfométricas del relieve, a partir de la base anterior de datos. Se logró identificar, para cada contorno morfográfico, el par de clases de energía con la mayor superficie ocupada, quedando así la versión preliminar del mapa de las unidades geomorfométricas del relieve. La Figura 3 muestra la energía del relieve predominante, mientras que la Figura 4, la secundaria, según la superficie ocupada por contorno morfográfico.

4. *Asignación, por contorno morfográfico, de las clases de energía del relieve predominante y secundaria, según su porcentaje de superficie ocupada.* Este procedimiento se aplicó a cada una de las 33 107 entidades geográficas obtenidas mediante el análisis espacial y el procesamiento estadístico de la densidad de curvas de nivel, como expresión tridimensional de

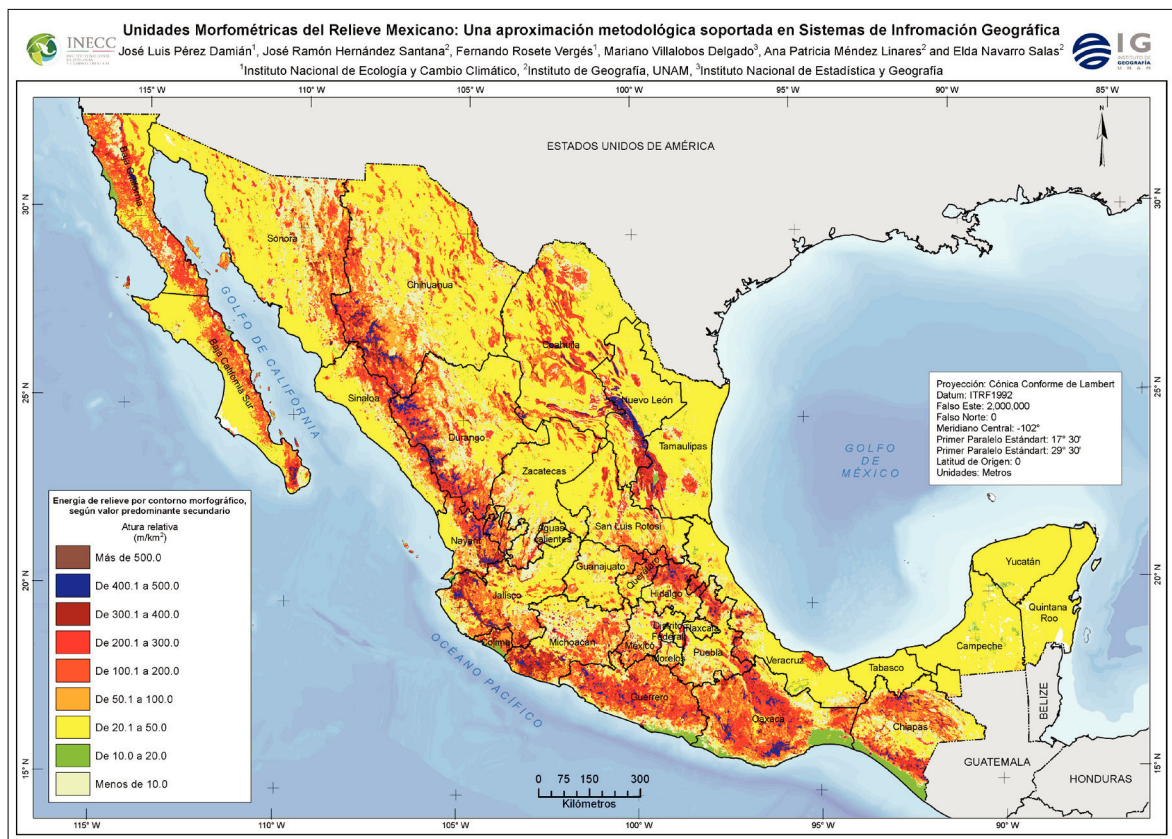


Figura 3. Energía o amplitud del relieve predominante, en m/km^2 .

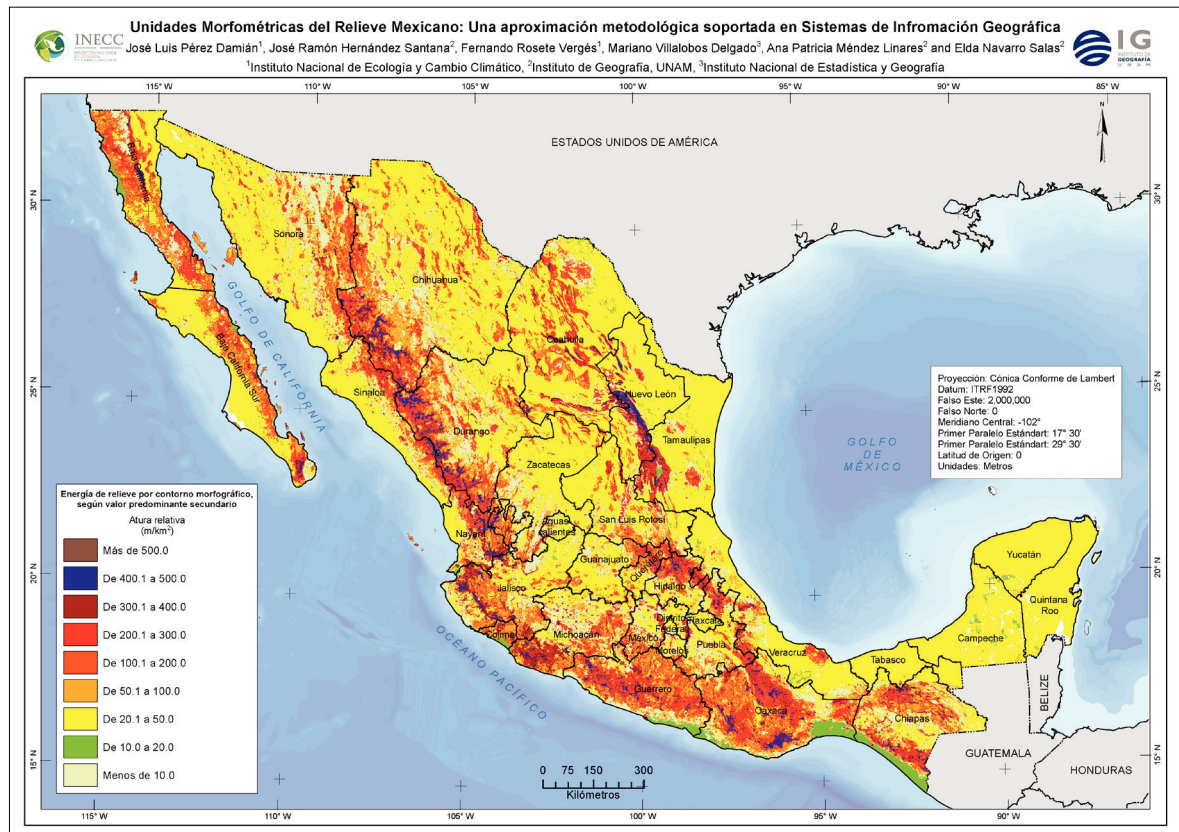


Figura 4. Energía o amplitud del relieve secundaria, en m/km^2 .

la morfología del relieve. Para ello se contó con una tabla de atributos de la información geográfica integrada de la manera siguiente: llave (número del polígono, del 1 al 33 107); intervalo de la energía del relieve (hasta 9 clases posibles, por entidad) y superficie ocupada (en km^2) por cada clase.

La asignación final de las clases de energía del relieve predominante y secundaria, por contorno morfográfico, se basó en el cálculo e identificación de las dos clases con el par de porcentajes más altos de área ocupada, para finalmente establecer el par de clases que definen, por presencia significativa, a cada uno de los contornos morfográficos. Este análisis ofreció mayor precisión al trabajo y redujo el esfuerzo de ajuste de contornos a la realidad geomorfológica.

Para la elaboración de la leyenda final se analizaron los intervalos de energía del relieve, ajustándolos al carácter morfológico del relieve,

de sus categorías (montañas, lomeríos y llanuras) y subcategorías del relieve (montañas altas, medias, bajas, premontañas, lomeríos grandes y pequeños, y llanuras, altas, medias, bajas y muy bajas) y de su patrón orohidrográfico (Figura 5), así como mostrando una fotografía oblicua del relieve correspondiente a cada tipo y su fragmento cartográfico real.

La revisión de campo contempló recorridos por los estados de Morelos, Puebla, Veracruz, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Estado de México y la Ciudad de México (antiguo Distrito Federal).

RESULTADOS

Valoraciones morfométricas

La aplicación de la metodología propuesta para este análisis geomorfométrico nacional, a escala 1:250 000 y a partir de dos índices morfométricos

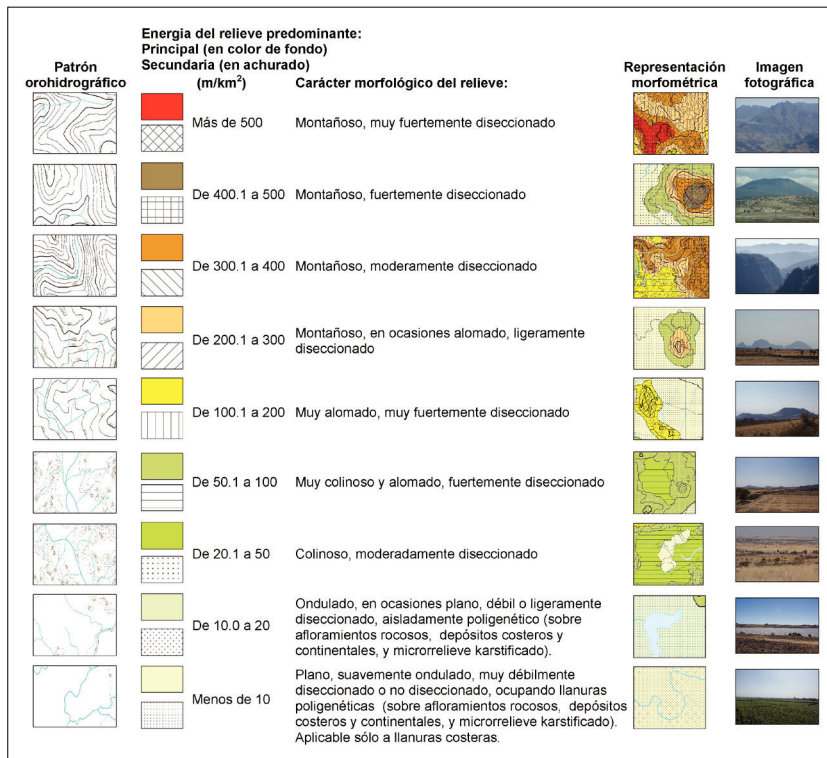


Figura 5. Tipos de unidades geomorfológicas del relieve de México.

(morfografía por densidad de curvas de nivel y energía del relieve), constituye una vía de acercamiento entre la realidad matemático-estadística del procesamiento automatizado de los datos topográficos disponibles y la realidad de la distribución de la morfografía general y de la energía del relieve de México. Aunque en muchas ocasiones estas realidades no siempre se corresponden con absoluta precisión, pues la existencia de geoformas del relieve, con rasgos morfológicos similares y con idéntica densidad de curvas de nivel, pueden presentar diferente energía, debido a los atributos naturales del propio relieve, esencialmente con el grado de resistencia de la litología al modelado exógeno.

Resulta bien conocido que para cualquier valoración del relieve es indispensable ajustarse a las características morfográficas de la geometría de la superficie terrestre. En este caso, ajustarse a la densidad de curvas de nivel, como uno de los elementos básicos de configuración, diseño y proyección planimétrica de las geoformas del relieve, fue una de las vías más prácticas para precisar la magnitud de la energía de la superficie terrestre.

Una vez elaborados los mapas de morfografía del terreno (Figura 1), constituido por 33 107 entidades geográficas, y de energía del relieve (Figura 2), el procedimiento metodológico previó su superposición, con vistas a obtener las unidades geomorfológicas sobre la base de las unidades morfográficas, así como identificar los diferentes porcentajes de clases de energía del relieve en cada una de las mismas. Esto obligó a tomar el criterio de asimilar aquellos polígonos con valor predominante principal (cuyo valor de superficie dentro de la misma superara el 70 % de su cobertura total), con una representación cartográfica de fondo de color cualitativo, así como los polígonos de predominancia secundaria con una representación cartográfica mediante diferentes achurados.

Otro de los criterios sobre la generalización del predominio de las clases de energía de relieve fue asignar solo una categoría predominante para toda la unidad morfográfica, siempre que su valor de superficie dentro de la misma superara el 70% de su cobertura total. Esta característica la presentaba casi una tercera parte de las unidades morfográficas

del territorio nacional (12 480 unidades), por lo que asumieron el valor de la energía predominante principal, con porcentajes entre 70 y 100 de la superficie de la unidad morfográfica. Para el resto de las unidades morfográficas, un total de 20 627, se presentaban valores de predominancia principal y secundaria relativamente cercanos, los primeros representados en fondo cualitativo de color, y los segundos en fondo de achurados; los restantes valores de predominio decreciente fueron asimilados por el valor predominante principal de la unidad morfográfica. La correlación de la existencia o no de ambos predominios permitió establecer 50 clases de agrupamientos.

Estas clases ofrecen el número de unidades morfográficas con idéntica característica de energía predominante, ya sea la única en la unidad morfográfica o compartida con el valor de la secundaria; las categorías de la energía predominante y secundaria; el área que ocupan y el porcentaje con relación a la superficie del territorio nacional. Por ejemplo, en la clase 1 se agrupan 791 unidades morfográficas, con una predominancia absoluta de la energía del relieve de 501-1300 m/km², de relieve montañoso muy fuertemente diseccionado, representado en su mayoría por montañas altas y medias. Esta categoría de disección vertical es la predominante principal y única en estos 791 polígonos, y ocupa una superficie de 5 541 km², que representan el 0.28 % del país.

La clase 2 está constituida por 618 unidades morfográficas, ocupadas por dos categorías de energía, la de 501-1 300 m/km² (relieve montañoso muy fuertemente diseccionado, representado en su mayoría por montañas altas y medias), como predominante, y la de 401-500 m/km² (relieve montañoso fuertemente diseccionado, representado en su mayoría por montañas bajas), como secundaria, ocupando ambas categorías unos 13 602 km² para un 0.7% del territorio nacional. En general, la distribución del espectro de la energía del relieve para todo el país, calculado bajo la aplicación de esta metodología morfográfico-morfométrica, automatizada y soportada en el SIG Arc Gis, v. 9.3, se ajusta a la realidad fisiográfica nacional. La Figura 6 presenta un fragmento del mapa nacional de unidades geomorfométricas del relieve,

en este caso, de la hoja G14-7 Monterrey, a escala 1:250 000.

Correlaciones geomorfométricas con las categorías geomorfológicas del relieve

El análisis nacional revela que el relieve montañoso muy fuertemente diseccionado, correspondiente a la amplitud de 501 a 1 300 m /km², está asociado a la porción central de la Sierra Madre Occidental, al sector guerrerense central de la Sierra Madre del Sur, a las sierras de Miahuatlán y de Juárez, y en sectores aislados de la Sierra Madre de Chiapas y de la Sierra Madre Oriental. Estas regiones orogénicas coinciden con los territorios de mayores amplitudes e intensidades ascendentes de los movimientos neotectónicos, formadores del relieve moderno de México.

Las unidades morfométricas con valores entre 401 y 500 m/km² expresan un relieve montañoso fuertemente diseccionado, ocupan los ejes de la Sierra Madre Occidental, la Oriental y la del Sur; la Sierra Madre de Chiapas, la Sierra de la Laguna y numerosas edificaciones volcánicas del altiplano central. Bordeando estas grandes morfoestructuras montañosas se localizan las unidades con valores entre 301 y 400 m/km², que conforman un modelado montañoso moderadamente diseccionado, relacionado principalmente con el emplazamiento de los escalones premontañosos altos.

Los valores de la categoría entre 201 y 300 m/km² muestran un relieve ligeramente diseccionado, asociado a las premontañas bajas y lomeríos altos; mientras que entre los 101 y 200 m/km², aparecen los lomeríos medianos y grandes. Por otra parte, el relieve colinoso y alomado posee valores entre 51 y 100 m/km², y en las llanuras altas y medianas alcanza entre 21 y 50 m/km².

Finalmente, las unidades con valores entre 0 y 20 m/km² se extienden por las llanuras bajas y muy bajas de los estados costeros.

CONCLUSIONES

La metodología para la determinación de las unidades geomorfométricas del relieve del territorio nacional, a escala 1:250 000 (122 hojas cartográ-

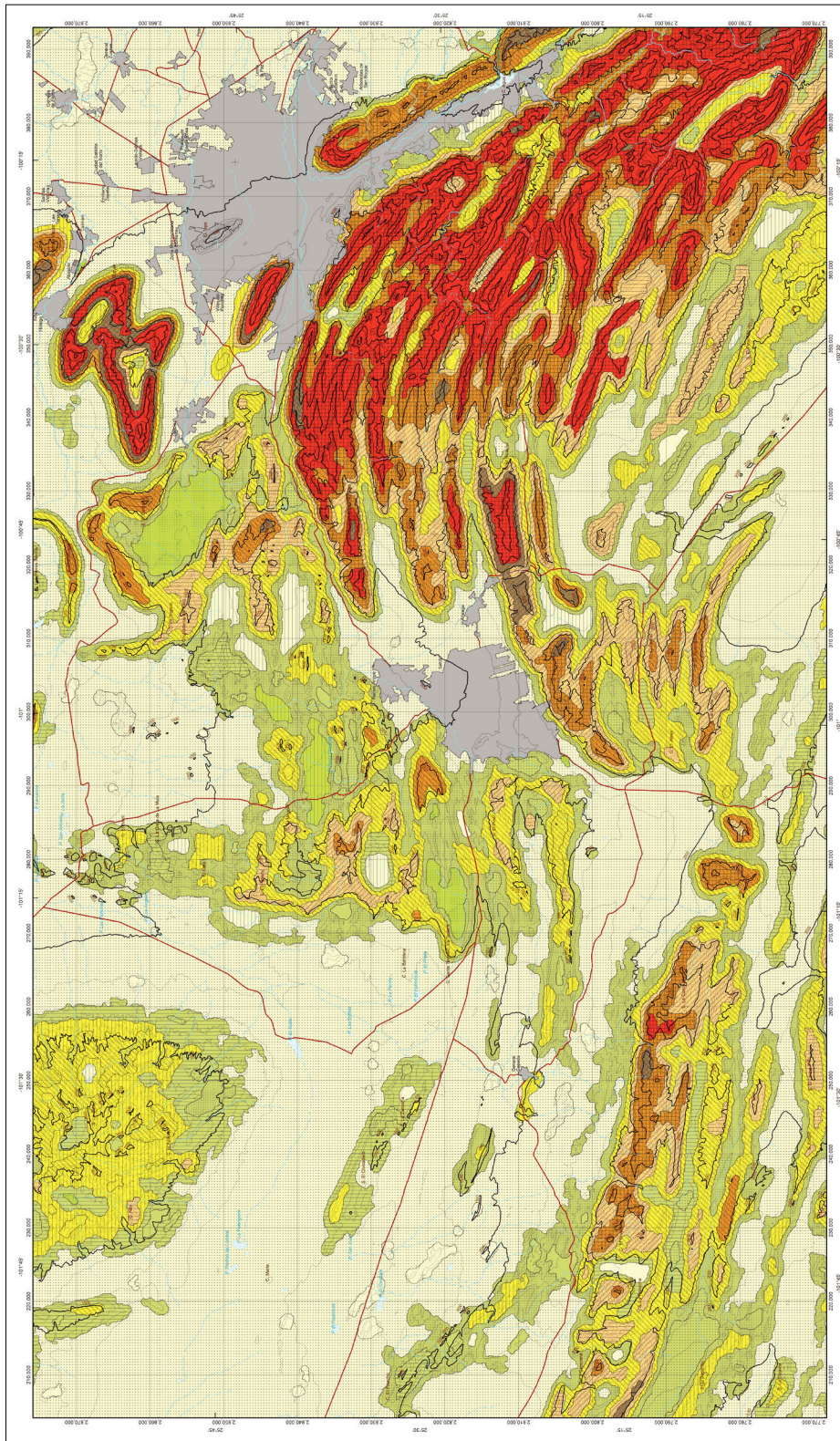


Figura 6. Unidades geomorfológicas del relieve de la hoja G14-7 Monterrey, a escala 1:250 000.

ficas), y soportada en la plataforma Arc Gis, v.9.3, que tomó como base morfográfica del relieve a la densidad de curvas de nivel, arrojó resultados bastante precisos y coherentes entre las realidades matemático-estadística y geomorfológica del relieve.

El análisis morfográfico y morfométrico ulterior reveló que esa correspondencia no es absoluta, sino que dentro de una misma unidad morfográfica existen distintas clases de energía del relieve, lo que determinó el procesamiento estadístico de las mismas para cada unidad morfográfica, con vistas a la identificación areal de cada una de ellas, y establecer clases de predominancia principal y secundaria para ofrecer mayor precisión a los resultados, aspecto muy positivo para reflejar la verdadera imagen de la energía del relieve nacional.

Los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología morfográfico-morfométrica resultan de incalculable valor para aplicaciones agrícolas, urbanas y de protección civil, todas muy involucradas con los programas de ordenamiento ecológico municipal, estatal y el general del territorio. Indiscutiblemente, los resultados automatizados en la consecución de la correlación directa entre la morfografía y la energía de su relieve ofrecen la posibilidad de identificación, a gran detalle, de sus variaciones dentro de cada geoforma, relacionando frecuentemente diferentes clases de energía con distintos morfoelementos del relieve, y en ocasiones, con cambios no perceptibles por métodos tradicionales ni de investigaciones de campo. Este es uno de los aportes del método, gracias a la precisión numérica del proceso automatizado, tomando muy en consideración las regularidades del modelado geomorfológico.

La expresión cartográfica, a escala 1:250 000, presenta varios niveles informativos: 1) morfográfico, compuesto por contornos de las unidades morfográficas, determinadas a partir de la densidad de curvas de nivel; 2) morfométrico, con fondo de color cualitativo para las categorías de energía del relieve predominante y con achurados lógicos para las mismas categorías, pero en su condición de presencia secundaria; y 3) topográfico, con la inclusión de las curvas de nivel, para facilitar la localización con precisión y permitir otros nuevos análisis, por parte de los especialistas usuarios y

de los investigadores relacionados con la temática.

La representación cartográfica nacional muestra dieciséis clases de energía del relieve, ocho predominantes principales con fondo cualitativo de color, y ocho secundarias en diferentes achurados, con lo cual se obtuvo un mayor acercamiento entre la realidad numérica y la expresión real del fenómeno geográfico estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) el apoyo presupuestario del proyecto “Asesoría técnica para la elaboración del mapa de unidades geomorfométricas del relieve mexicano, a escala 1:250 000” (INE/A1-009/2011). Un especial reconocimiento a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y acertadas sugerencias durante el proceso de arbitraje científico.

REFERENCIAS

- Academias de Ciencias de Cuba y Academia de Ciencias de la URSS. (1970). Disección vertical, en *Atlas Nacional de Cuba*, La Habana.
- Brasington, J., Rumsby, B. T. y Langham, J. A. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53, 299-316.
- Dumont, J. F., Santana, E. y Vilema, W. (2005). Morphologic evidence of active motion of the Zambapala Fault, Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Geomorphology*, 65, 223-239.
- Ehsani, A. H. y Quiel, F. (2008). Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neuronal networks. *Geomorphology*, 99, 1-12.
- Filosov, B. Ya. (1950). *Manual breve de búsqueda de las estructuras tectónicas por el método morfométrico*. URSS: Ed. Saratov.
- Gabet, E. J. y Bookter, A. (2008). A morphometric analysis of gullies scoured by post-fire progressively bulked debris flows in southwest Montana, USA. *Geomorphology*, 96, 298-309.
- García-Ariza, M. T. y Lugo-Hubp, J. (2003). *El relieve mexicano en mapas topográficos*, Serie Libros, núm. 5, México: Instituto de Geografía, UNAM. 148 p.

- Geographic Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. (1989). *National Atlas of Hungary*. Budapest: Hungarian Academy of Sciences.
- Giles, P. T. y Franklin, S. E. (1998). An automated approach to the classification of the slope units using digital data. *Geomorphology*, 21, 251-264.
- Hernández-Santana, J. R., J. Lugo Hubp y Ortiz Pérez, M. A. (2007). Morfoestructuras regionales. En A. Coll Hurtado (Ed.). *Nuevo Atlas Nacional de México*. México, D. F. p. NA-III-1, 3 hojas.
- Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics, *Transactions American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- INEGI. (2008). Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. México: INEGI. 679 p.
- Inkpen, R. J., Stephenson, W. J., Kirk, R. M., Hemmingsen, M. A. y Hemmingsen, S. A. (2010). Analysis of relationships between micro-topography and short- and long-term erosion rates on shore platforms at Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Geomorphology*, 121, 266-273.
- Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba. (1989). Disección vertical. En G. Oliva Gutiérrez (Coord.). *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional de España, p. IV.1.4.
- Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. (1990). Morfometría 1. En A. García de Fuentes (ed.). *Atlas Nacional de México*, México: UNAM.
- Jain, V. E. (1980). *Geotectónica general*. Moscú: Ed. Mir. 357 p.
- Jamieson, S. R., Sinclair, H. D., Kirstein, L. A. y Purves, R. S. (2004). Tectonic forcing of longitudinal valleys in the Himalaya: Morphological analysis of the Ladakh Batholith, North India. *Geomorphology*, 58, 49-65.
- Kovanen, D. J. y Slaymaker, O. (2008). The morphometric and stratigraphic framework for estimates of debris flow incidence in the North Cascades foothills, Washington State, USA, *Geomorphology*, 99, 224-245.
- Langbein, W. B. (1947). *Topographic characteristics of drainage basins*. U. S. Geological Survey. Water Supply Paper 968-C, 126-157 p.
- Lugo-Hubp, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. México: Instituto de Geografía, UNAM. 128 p.
- Lugo-Hubp, J. (1992). Morfometría de la República Mexicana. *Estudios Geográficos*, 53(206), 77-91.
- Lugo-Hubp, J., Córdova, C., Aceves Quesada, J. F. y García Arizaga, M. T. (1990a). Morfometría 1. En A. García Silberman de Fuentes (Ed.). *Atlas Nacional de México*. México: Instituto de Geografía, UNAM, p. IV.3.1.
- Lugo-Hubp, J., Córdova, C., Aceves Quesada, J. F. y García Arizaga, M. T. (1990b). Morfometría 2. En A. García Silberman de Fuentes (Ed.). *Atlas Nacional de México*. México: Instituto de Geografía, UNAM, p. IV.3.2.
- Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. México: Instituto de Geografía, UNAM. 480 p.
- Parrot, J. F., Ochoa Tejeda, V. y Lugo Hubp, J. (2008). 3-dimensional drainage network analysis. A key for geomorphologic studies. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 52(2), 237-255.
- Parrot, J. F. (2013). Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation (Manual de utilización del software TLALOC). México: Instituto de Geografía, UNAM. Recuperado el 2 de febrero de 2017 de: http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/software/Tlalom/Manual_TLALOC_V1.pdf
- Priego Santander, A. G. y Pérez Damián, J. L. (2003). Tipos morfométricos del relieve. Recuperado el 25 de marzo de 2014 de. <http://www2.ine.gob.mx/emapas/>
- Romero Díaz, Ma. A. y López Bermúdez, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revision crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*, 12, 47-62.
- Slovak Cartography. (1983). *Atlas of the Slovak Socialist Republic*. E. Mazur y Jakal, J. (Eds.). Bratislava: Veda Publishing House of the Slovak Academy of Sciences.
- Spiridonov, A. I. (1974). *Cartografía geomorfológica*. Moscú: Nedra. 182 p. (en ruso).
- Spiridonov, A. I. (1982). *Metodología general de las investigaciones geomorfológicas y la cartografía geomorfológica*. La Habana: Ed. Universidad de La Habana.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 1117-1142.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38, 913- 920.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. T. Chow (Ed.). *Handbook of Applied Hydrology* (Vol. 4, pp. 39-76), Nueva York: McGraw-Hill.
- Yetemen, O., Istanbuluoglu, E. y Vivoni, E. R. (2010). The implications of geology, soils, and vegetation on landscape morphology: Inferences from semi-arid basins with complex vegetation patterns in Central New Mexico, USA. *Geomorphology*, 116, 246-263.