

# DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS GEOMORFOMÉTRICA NACIONAL

## DEVELOPMENT OF GEOMORPHOMETRIC NATIONAL DATA BASE

Víctor Manuel Salas Aguilar<sup>1†</sup> y Fernando Paz Pellat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa Mexicano del Carbono. Chiconautla No. 8, Col. Lomas de Cristo, CP 56230, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>2</sup>GRENASER, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México-Texcoco, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>†</sup>Autor para correspondencia: vsalasaguilar@gmail.com

### RESUMEN

Se ha demostrado en múltiples investigaciones que los parámetros geomorfométricos tienen relación directa con variables fisiográficas. Sin embargo, en México existe una necesidad de hacer interoperable y sistemática la información relacionada a estos procesos para generar investigación a escala regional y nacional. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar una base de datos sistematizada que almacene diversos índices geomorfométricos, la prueba de concepto se realizó en el Estado de México. A partir de un modelo digital de elevación de 60 m de resolución espacial, se derivaron 13 parámetros morfométricos. Los programas SAGA GIS, Python 2.7<sup>MR</sup> y SQLITE 3.0 fueron empleados para generar, procesar y almacenar la información, respectivamente. Se utilizó un producto vectorial equidistante como base para integrar las variables del relieve. El vector cuenta con 355 624 registros etiquetados y referenciados espacialmente. La base de datos procesada contiene registros de la ubicación e identificador del pixel, así como estadísticas básicas de los parámetros geomorfométricos generados a una resolución espacial de 250 m. La información generada está disponible gratuitamente en página en línea del Programa Mexicano del Carbono. En próximos estudios la base de datos se procesará para los demás estados de la república y se actualizará en el dominio otorgado.

**Palabras clave:** interoperabilidad; geoprocesamiento; relieve; síntesis de información.

### ABSTRACT

It has been shown in multiple investigations that geomorphometric parameters are directly related to physiographic variables. However, in Mexico there is a need to make interoperable and systematic information related to these processes to generate research at regional and national level. Therefore, the objective of this work was to develop a systematized database that stores various geomorphometric indexes, the proof of concept was carried out in the State of Mexico. From digital elevation model 13 morphometric parameters were derived. The SAGA GIS, Python 2.7<sup>RM</sup> and SQLITE 3.0 programs were used to generate, process and store the information, respectively. An equidistant vector product was used as a basis to integrate the relief variables. The vector has 355 624 records labeled and spatially referenced. The processed database contains data of the location and identifier of the pixel, as well as basic statistics of the geomorphometric parameters generated at a spatial resolution of 250 m. The information generated is freely available in online page of the Mexican Carbon Program. In future studies the database will be processed for the other states of the republic and will be updated in the given domain.

**Index words:** interoperability; geoprocessing; relief; synthesis of information.

## INTRODUCCIÓN

La geomorfometría se define como la ciencia que analiza cuantitativamente la superficie terrestre (Rasemann *et al.*, 2004). Esta disciplina es un componente fundamental en la distribución de otros elementos fisiográficos como: geología, geomorfología, clima y suelo (Muñoz y Morisson, 2017).

Los análisis de geomorfometría se han popularizado por la manipulación de modelos digitales de elevación (MDE), que es una representación numérica del relieve (Pike, 2000). La principal tarea en un análisis geomorfométrico es la extracción de parámetros y objetos de un MDE, los cuales pueden ser agrupados en parámetros primarios, si son derivados directamente de un MDE y parámetros secundarios, si se realiza un proceso adicional al MDE para generar información del relieve (MacMillan y Shary, 2009).

La disponibilidad de sistemas de información geográfica (SIG) para procesar parámetros del relieve es amplia; sin embargo, existe una variación en los procesos que hace cada SIG; por ejemplo, algunos programas están enfocados solo al componente espacial (ArcGIS, GRASS, ILWIS), otros a la parte hidro-geomorfométrica (TAS, RiverTools) y, por último, existen otros especializados para analizar el relieve (MicroDEM, LandSerf, SAGA) (Wood, 2009). También, es importante señalar que algunos programas son de acceso libre (no existe un cobro por la licencia), esto permite explorar diversas herramientas (por ejemplo, lenguajes de programación y sistemas de base de datos) que procesen una gran cantidad de información del MDE y, de esta manera, poder generar bases de datos geomorfométricas con la misma filosofía de acceso libre, es decir, que cualquier usuario pueda copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar la base de datos propuesta (Mantovani *et al.*, 2010).

A nivel mundial se han hecho esfuerzo para procesar información fisiográfica a gran escala; por ejemplo, la base mundial de suelo y superficie terrestre (SOTER, por sus siglas en inglés) (Oldeman y van Engelen, 1993), fisiografía continental, clima y distribución de la población (Small y Cohen, 2004), base de datos de cobertura terrestre (Homer *et al.*, 2004), base mundial climática (Hijmans *et al.*, 2004), estado fenológico de la vegetación (Robinson *et al.*, 2017), por citar algunos. La mayoría de estos estudios tienen el objetivo de compartir la información para producir conocimiento; sin embargo, en países como México, aún existen barreras conceptuales, tecnológicas y culturales que

impiden que se propague la información generada al usuario común (Vargas *et al.*, 2017).

Una de las propuestas del Programa Mexicano del Carbono es realizar el procesamiento, síntesis y publicación de información relacionada con investigaciones del ciclo del carbono a nivel nacional. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue generar una base de datos de variables geomorfométricas para el país, en función del prototipo desarrollado para el Estado de México, lo anterior con la visión de desarrollar una base de datos nacional que esté disponible de manera gratuita.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Estado de México, se localiza en la parte sur de la altiplanicie meridional de la República Mexicana, entre los paralelos 18°22' y 20°17' de latitud Norte y los meridianos 98°36' y 100°37' de longitud Oeste, tiene una superficie de 22 333 km<sup>2</sup>. El relieve del Estado de México es variado; presenta grandes planicies y cuatro grandes sistemas montañosos: (1) la sierra Nevada al límite con el estado de Puebla donde se presenta los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl que son el segundo y el tercer pico más alto de México; (2) las sierras de Monte Alto y Monte Bajo que son los límites con el oeste del Distrito Federal; (3) la sierra del Xinantécatl al centro de la entidad donde se encuentra el volcán Nevado de Toluca, el cuarto pico más alto de México; y (4) la Sierra de San Andrés Timilpan se ubica al noroeste del estado (INEGI, 2001).

### Modelo digital de elevación y parámetros geomorfométricos

Aunque en México existen MDEs con resoluciones espaciales menores a las usadas en esta investigación, la resolución empleada es congruente a lo investigado por Grohmann (2015), que establece que para estudios regionales se deben utilizar resoluciones gruesas (>50 m) y remuestrearlas solo si el estudio lo justifica. La naturaleza del trabajo no es contrastar los parámetros creados con evidencia de campo, porque se derivan a partir de un (MDE), el cual es creado a través de datos puntuales (datos duros) y análisis geoestadístico parte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015). De acuerdo a lo anterior, el insumo principal para generar variables geomorfométricas fue un MDE con una

resolución espacial de 60 m (INEGI, 2015). A partir del MDE se generaron 13 índices geomorfométricos dentro del programa “Sistema para el análisis automatizado

de procesos geo-científicos” (SAGA, por sus siglas en inglés) (<http://saga-gis.wiki.sourceforge.net/>), los cuales se describen en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Características de los parámetros geomorfométricos.**

<b>Parámetros geomorfométricos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente</b>
Orientación	La posición de un pixel con respecto a una dirección en particular.	Yokoyama <i>et al.</i> (2002)
Convexidad	Utiliza la segunda derivada de un valor de elevación, el algoritmo produce valores altos en áreas convexas hacia arriba y valores mínimos en áreas cóncavas.	Iwahashi y Pike (2007)
Índice de protección morfométrica (IPM)	Analiza el entorno alrededor de un pixel hasta una distancia determinada y evalúa como el relieve lo protege.	Yokoyama <i>et al.</i> (2002)
Índice de topográfico de humedad (ITH)	Es un indicador de la acumulación de agua, su cálculo está basado en la pendiente y el área de la cuenca modificada.	Moore <i>et al.</i> (1988)
Altura topográfica (m) (AT)	Distancia vertical entre un punto en la superficie topográfica y su proyección en una superficie de elevaciones mínimas.	Conrad <i>et al.</i> (2015)
Posición media de la pendiente (PMP)	Asigna un valor de cero a pixeles que se encuentran a media ladera y el valor de uno a pixeles cercanos a valles y puntos altos del relieve.	Dietrich y Böhner (2008)
Altitud normalizada (AN)	La diferencia normalizada entre la altura de la pendiente y profundidad del valle. Asigna el valor de uno al valor del pixel más alto y el valor de cero al pixel de menor altitud con respecto a un área de referencia.	Dietrich y Böhner (2008)
Altura-Pendiente (AP)	Proporciona la altura relativa del área de drenaje acumulada más cercana.	Dietrich y Böhner (2008)
Pendiente (en radianes)	Mide el grado de inclinación del terreno.	Conrad <i>et al.</i> (2015)
Índice de rugosidad del terreno (IRT)	Mide la heterogeneidad topográfica mediante el cálculo de la desviación estándar de un pixel con respecto a sus ocho pixeles vecinos.	Riley (1999)
Índice de textura del terreno (ITT)	Calcula el número de valles y cumbres dentro de un espacio topográfico.	Iwahashi y Pike (2007)
Índice de posición topográfica (IPT)	Compara el valor de un pixel del MDE con respecto al valor medio de sus vecinos. Los valores positivos corresponden a pixeles con mayor altitud con respecto al área de referencia, por su parte valores negativos corresponden pixeles con menor altitud con respecto al área de referencia.	Guisan <i>et al.</i> (1999)
Profundidad del valle (PV)	Calcula la distancia vertical con respecto a un nivel base de la red hídrica.	Conrad <i>et al.</i> (2015)

### Extracción de la información a una resolución espacial de 250 m

Los valores de los parámetros geomorfométricos se extrajeron a partir de un producto vectorial equidistante (malla satelital), que esta acoplado sistemáticamente con el tamaño del pixel de una imagen MODIS a escala nacional. La malla satelital, consiste de una red de pixeles o predios de 6.25 ha (250 m x 250 m) que están enmarcados por la envolvente que se muestra en la Figura 1. La malla está segmentada a nivel estatal, para el caso del Estado de México cuenta con 355 624 polígonos, cada uno referenciado a una proyección Conforme Cónica de Lambert y etiquetado secuencialmente (identificador del polígono).

El proceso de extracción consistió en tres pasos: (i) derivar los parámetros geomorfométricos a partir de un

MDE; (ii) extraer la información con base en la malla satelital. La diferente escala espacial del MDE (60 m) con respecto a la malla satelital (250), permitió obtener valores de cuatro registros del MDE por cada pixel de la malla. Lo anterior dio pie a utilizar geoprocесamientos espaciales escritos en Python 2.7<sup>MR</sup> para extraer estadísticas básicas en diferentes tablas para cada parámetro (máximo, mínimo, rango, media y desviación estándar). Las tablas procesadas contienen información de las coordenadas geográficas, identificador del polígono y estadísticas básicas (Figura 2).

Por último, el paso (iii) consistió en unir las tablas en una base de datos general. Se empleó el programa SQLite 3.0 para construir un modelo entidad-relación en el que el campo *identificador* que pertenece a la malla satelital permitió unir las diferentes tablas y conservar sus atributos (Figura 3).

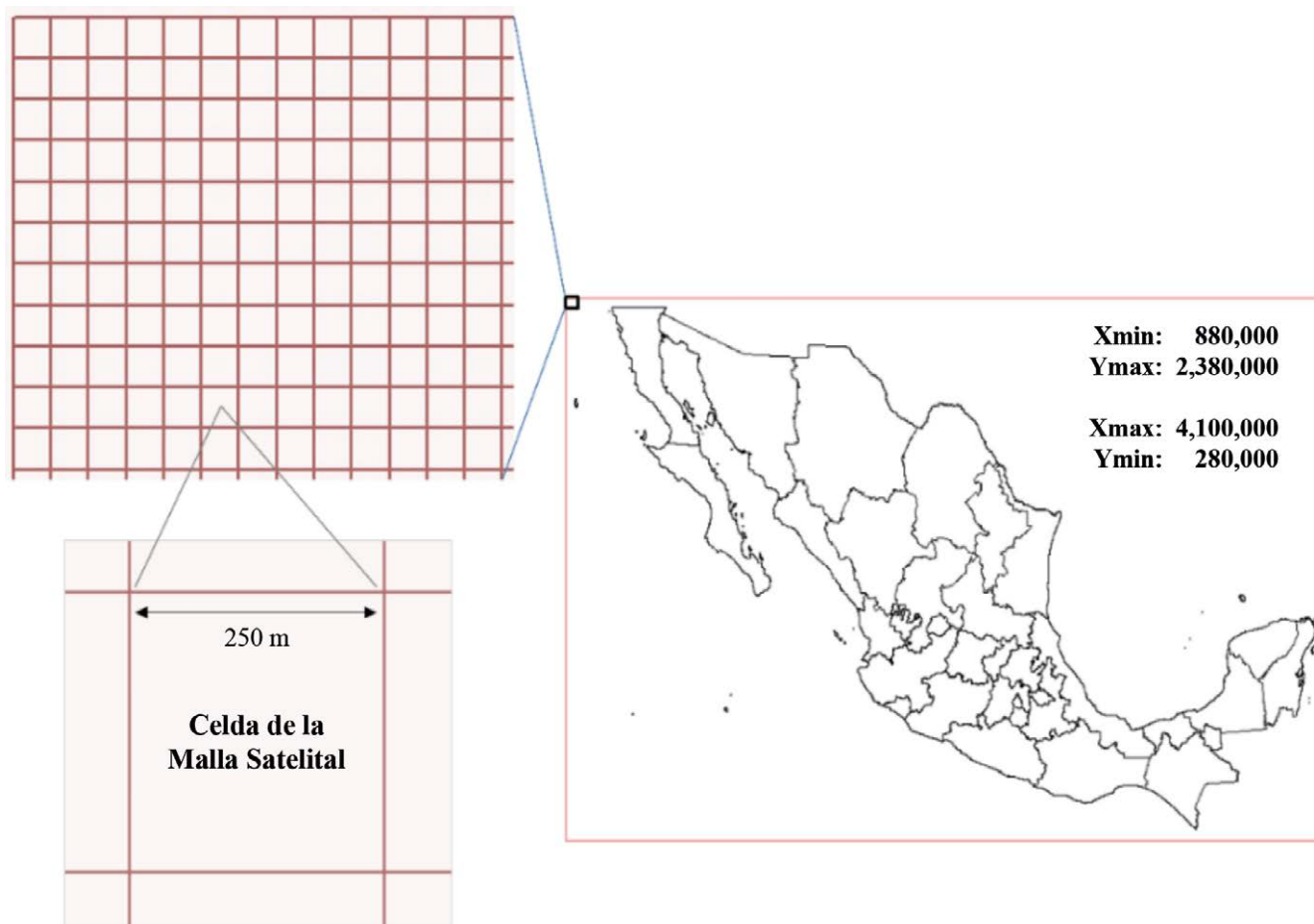


Figura 1. Malla satelital nacional. Xmin y Xmax, corresponden a las coordenadas mínimas y máximas, respectivamente, con respecto a la longitud. Ymin y Ymax, corresponden a las coordenadas mínimas y máximas, respectivamente, con respecto a la latitud.

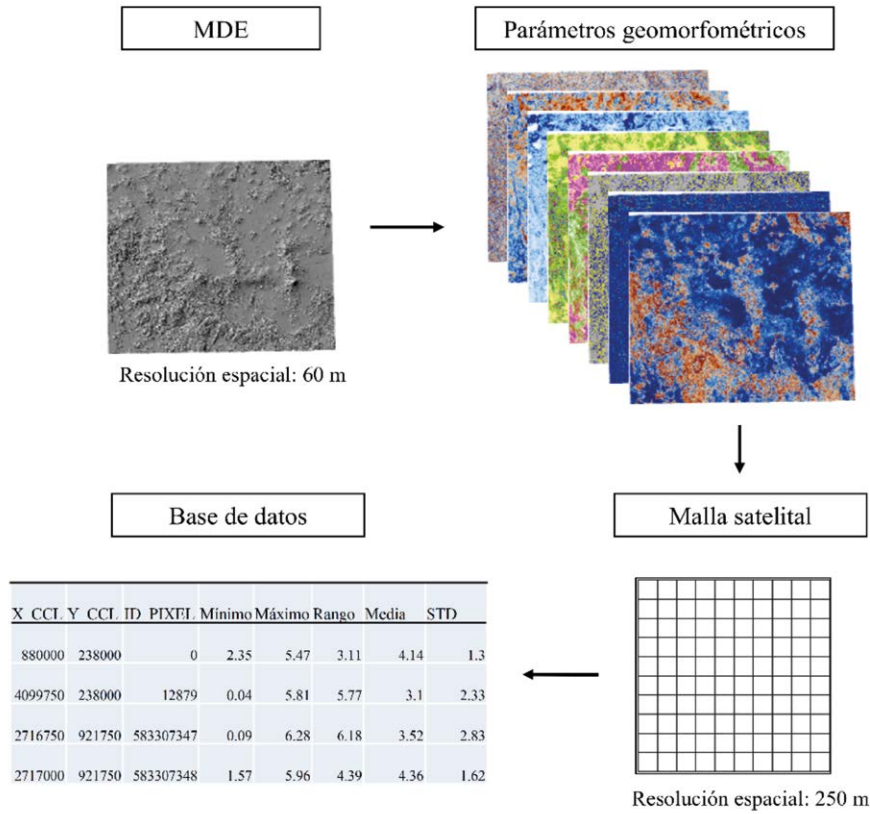


Figura 2. Metodología para derivación, procesamiento y almacenamiento de los parámetros morfométricos dentro de una malla satelital de 250 m.

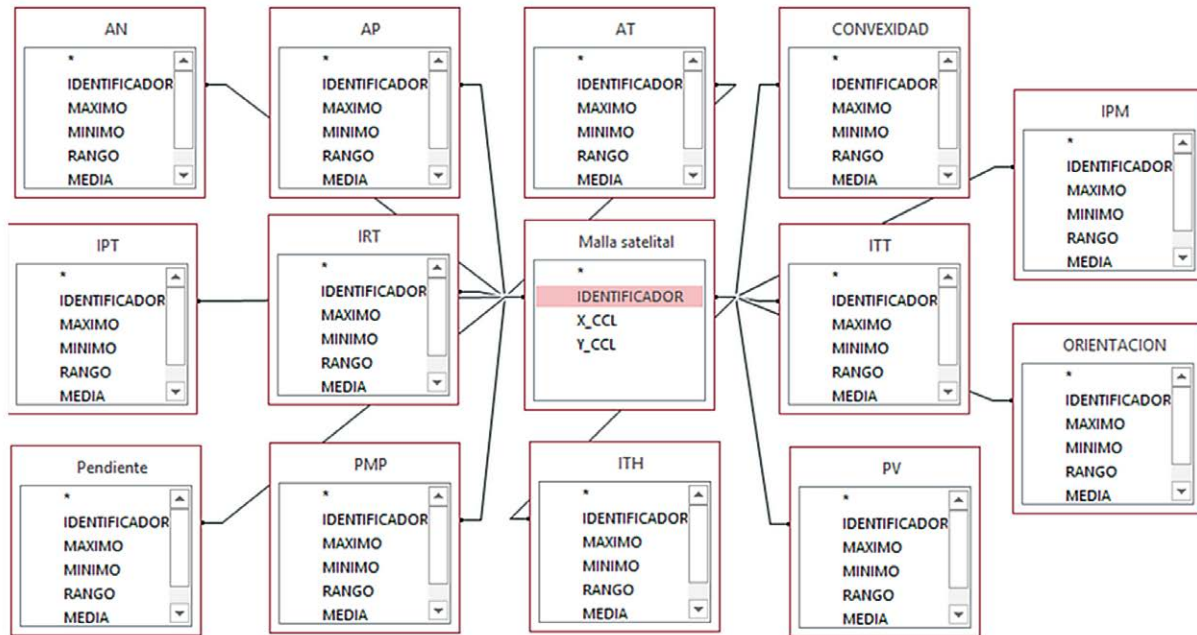


Figura 3. Modelo entidad-relación para generar una base de datos general que integre los parámetros geomorfolométricos con sus respectivos estadísticos.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los índices generados se observan en la Figura 4, cuya descripción está en el Cuadro 1 y su aplicación dependerá del caso de estudio del usuario, por ejemplo: en lo referente a investigaciones de patrones de vegetación, la geomorfometría puede ser usada para describir su medio ambiente físico (Antonic *et al.*, 2003). En el caso de estudios edáficos, Moore

*et al.* (1993) y Odeh *et al.* (1995) investigaron la relación de las propiedades del suelo con atributos del relieve a través de regresiones. En lo que respecta a investigaciones hidrológicas, Borselli *et al.* (2008) desarrollaron índices de conectividad sedimentológica a través de parámetros del terreno y, Price *et al.* (2011) encontraron relación del flujo base con elementos morfométricos.

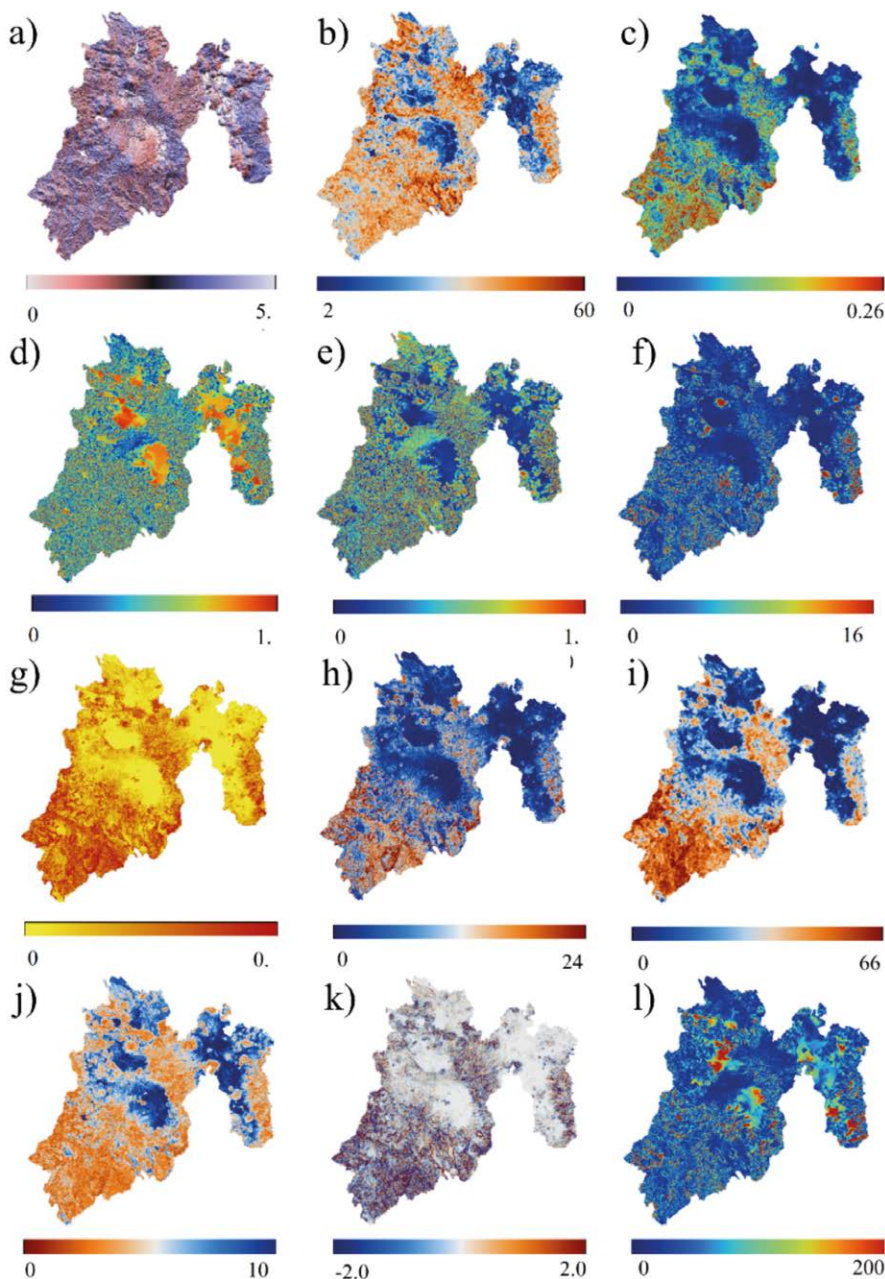


Figura 4. Valores de los parámetros geomorfométricos procesados: a) orientación; b) convexidad; c) índice de protección morfométrica; d) posición media de la pendiente; e) altura normalizada; f) altura-pendiente; g) pendiente; h) índice de rugosidad del terreno; i) índice de textura del terreno; j) índice topográfico de humedad; k) índice de posición topográfica; l) profundidad del valle.

Las investigaciones relacionadas a analizar las diferencias en el tiempo con respecto a los almacenes de biomasa, también se han apoyado de variables del relieve para mejorar sus predicciones. En Tsitsi *et al.* (2016) se presenta una revisión de las aplicaciones de sensores remotos con variables topográficas para mejorar las estimaciones de la biomasa, sin embargo, en estudios operativos a escala nacional es difícil implementar el procesamiento de información a nivel temporal (Robinson *et al.*, 2017). Una alternativa para realizar estos trabajos es explorar plataformas que almacenen y permitan procesar distintas fuentes de información a diferente escala espacio-temporal, tal es el caso de Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). El estudio de Hansen *et al.* (2013) fue pionero en caracterizar pérdidas y ganancias de extensión forestal

a nivel global de manera explícita con esta herramienta, dentro del periodo 2000-2012. Estos estudios son muy importantes, sobre todo para hacer comparaciones de la variable de interés a través del tiempo.

El análisis del relieve ofrece una herramienta operativa en lo referente a estudios de aptitud del uso de suelo. La Figura 5 presenta un parámetro de segundo orden llamado *clasificador de la superficie terrestre*, el cual es generado con base en sobreponer la pendiente, textura y convexidad, índices generados previamente. Este parámetro condiciona la forma de la tierra y ayuda a definir condiciones del paisaje en forma práctica (Iwahashi y Pike, 2007). Lo anterior es un buen indicador para generar información adicional de la base de datos, con un conocimiento previo del fenómeno que se esté investigando.

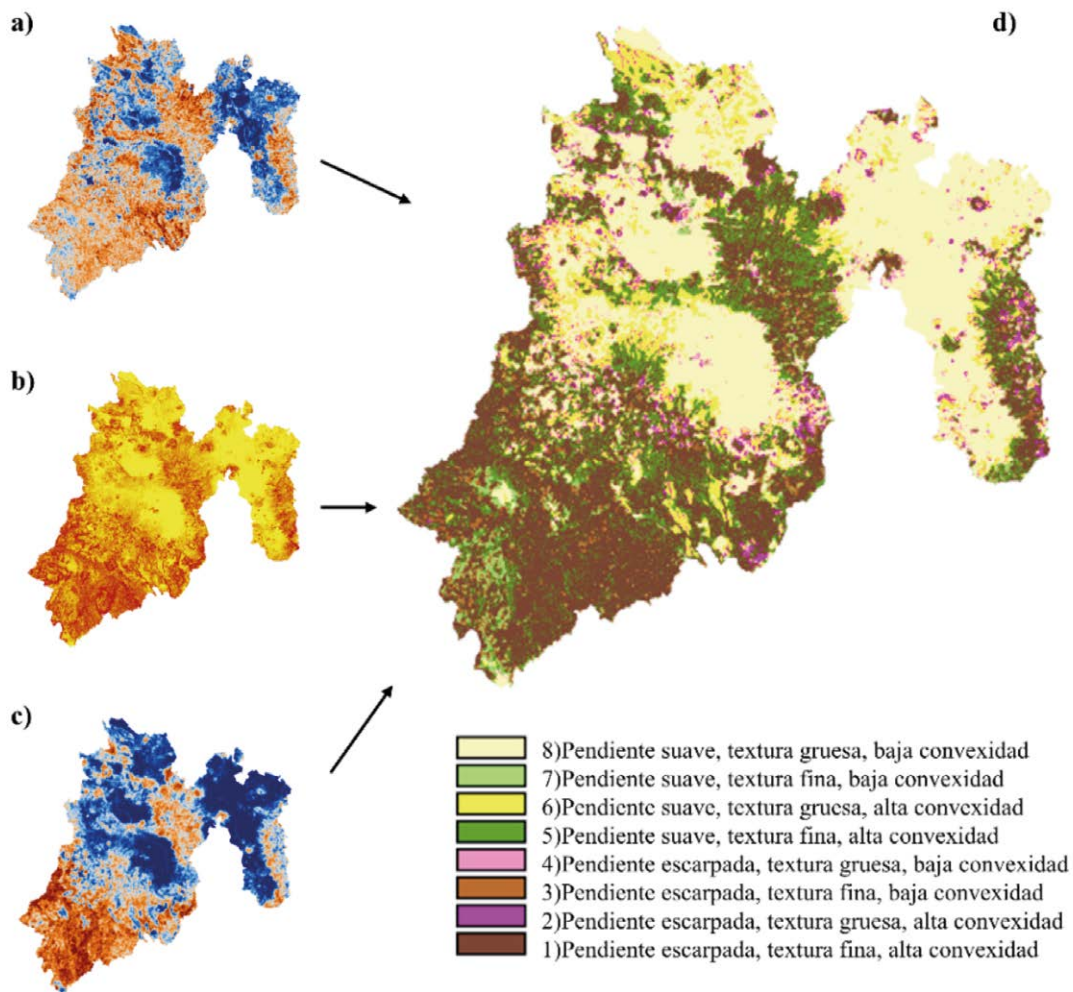


Figura 5. Ejemplo de la sobreposición de los índices a) textura; b) pendiente; c) convexidad, para la construcción de un nuevo parámetro geomorfométrico: d) clasificador de la superficie terrestre.

Por otra parte, la ventaja de la resolución espacial usada es que puede ser comparable con productos satelitales tipo MODIS, mismos que pueden ser añadidos y crear una base de datos fisiográfica a escala nacional (Homer *et al.*, 2004).

La base de datos (BD) creada esta almacenada en archivos estatales y puede consultarse en la siguiente liga: [http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/generales.php](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/generales.php). Los campos de la BD se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Descripción de la base de datos geomorfométrica generada.**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
X_CCL	Longitud*
Y_CCL	Latitud*
IDENTIFICADOR	Identificador del polígono o pixel de la malla satelital
Orientación (radianes)	
Convexidad	
Índice de protección morfométrica	
Índice topográfico de humedad	
Altura topográfica	Estadísticas del parámetro (mínimo, máximo, rango, media y desviación estándar). Cada Estadística representa una columna.
Posición media de la pendiente	
Altitud normalizada	
Altura de la pendiente	
Pendiente (radianes)	
Índice de rugosidad del terreno	
Índice de textura del terreno	Estadísticas del parámetro (mínimo, máximo, rango, media y desviación estándar). Cada Estadística representa una columna.
Índice de posición topográfica	
Profundidad del valle	

\*Latitud y Longitud están proyectadas en Conforme Cónica de Lambert.



La BD puede descargarse y obtener sus valores espaciales en un SIG. Las siguientes bases estarán dirigidas a desarrollar la misma metodología para los diferentes estados de la república. La información será trabajada por el grupo de trabajo y actualizada continuamente.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló una malla de índices geomorfométricos con una resolución espacial de 250 m para el Estado de México. Dichos índices fueron generados a partir de un modelo digital de elevación, sistemas de información geográfica, lenguajes de programación y manejador de base de datos. Todos los insumos y programas usados fueron de acceso libre, esto permitió hacer transparente las metodologías empleadas para calcular los parámetros del relieve.

La base de datos geomorfométrica está planeada para poder ser usada por una amplia variedad de potenciales usuarios, quienes pueden acceder a ella y derivar múltiples investigaciones relacionadas al tema. La base de datos se procesará para todos los estados de la república y será actualizada en la página de internet definida.

La propuesta de este trabajo es el de sintetizar información geomorfométrica, sin embargo, para estudios espacio-temporales operativos, se recomienda complementar esta base con datos disponibles en plataformas que permiten almacenar y procesar información fisiográfica a gran escala, todo ello para hacer trabajos comparativos a través del tiempo.

## LITERATURA CITADA

- Antonic, O., N. Pernar and S. D. Jelaska. 2003. Spatial distribution of main forest soil groups in Croatia as a function of basic pedogenetic factors. *Ecological Modelling* 170(2-3):363-371.
- Borselli, L., P. Cassi and D. Torri. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena* 75(3):268-277.
- Conrad, O., B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz, J. Wehberg, V. Wichmann, and J. Böhner. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4, *Geoscientific Model Development* 8(7):1991-2007.
- Dietrich, H. and J. Böhner. 2008. Cold air production and flow in a low mountain range landscape in Hessia (Germany), *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie* 19:37-48.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau y R. Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202:18-27.
- Guisan, A., S. B. Weiss and A. D. Weiss. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143(1):107-122.
- Grohmann, C. H. 2015. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers Geosciences* 77:111-117.
- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. Turubanova, A. Tyukavina and A. Kommareddy. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342(6160):850-853.
- Hijmans, R., S. Cameron, J. Parra, P. Jones and A. Jarvis. 2004. The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces. Ver. 1.3, edited.
- Homer, C., C. Huang, L. Yang, B. Wylie and M. Coan. 2004. Development of a 2001 national land-cover database for the United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70(7):829-840.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2001. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie 3. [http://buscador.inegi.org.mx//search?q=&required-fields=cve\\_titgen:3610&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=\\*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a\\_\\_inegi\\_politica\\_p72&lr=lang\\_es-%7Clang\\_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260](http://buscador.inegi.org.mx//search?q=&required-fields=cve_titgen:3610&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a__inegi_politica_p72&lr=lang_es-%7Clang_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260). (Consulta: diciembre 20, 2017).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2015. Continuo de Elevaciones Mexicano, escala 60 m. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. (Consulta: diciembre 12, 2017).
- Iwahashi, J. and R. J. Pike. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology* 86(3):409-440.
- MacMillan, R. and P. Shary. 2008. *Geomorphometry: concepts, software, applications*, edited. Elsevier Science. Chap. Landforms and Landforms elements in geomorphometry.
- Mantovani, F., F. J. Gracia, P. D. de Cosmo and A. Suma. 2010. A new approach to landslide geomorphological mapping using the Open Source software in the Olvera area (Cadiz, Spain). *Landslides* 7(1):69-74.
- Moore, I., G. Burch and D. Mackenzie. 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE* 31(4):1098-1107.

- Moore, I. D., P. Gessler, G. Nielsen and G. Peterson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis *Soil Science Society of America Journal* 57(2):443-452.
- Muñoz, V. y M. de Morisson-Valeriano. 2017. Modelado topográfico en Sistemas de Información Geográfica a partir de datos SRTM para aplicación en estudios del medio físico. *UD y la GEOMÁTICA* 10:5-11.
- Odeh, I. O., A. McBratney and D. Chittleborough. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67(3-4):215-226.
- Oldeman, L. and V. van Engelen. 1993. A world soils and terrain digital database (SOTER) — An improved assessment of land resources. *Geoderma* 60(1-4):309-325.
- Pike, R. J. 2000. Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24(1):1-20.
- Price, K. 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography* 35(4):465-492.
- Rasemann, S., J. Schmidt, L. Schrott and R. Dikau. 2004. *Geomorphometry in mountain terrain, GIS and Mountain Geomorphology*. Springer, Berlin. 145 p.
- Riley, S. J. 1999. Index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5(1-4):23-27.
- Robinson, N. P., B. W. Allred, M. O. Jones, A. Moreno, J. S. Kimball, D. E. Naugle, T. A. Erickson and A. D. Richardson. 2017. A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sensing* 9(8):863-884.
- Small, C. y J. Cohen. 2004. Continental physiography, climate, and the global distribution of human population. *Current Anthropology* 45(2):269-277.
- Tsitsi, B. 2016. Remote sensing of aboveground forest biomass: A review. *Tropical Ecology* 57(2):125-132.
- Vargas, R., D. Alcaraz-Segura, R. Birdsey, N. A. Brunsell, C. O. Cruz-Gaistardo, B. de Jong, J. Etchevers, M. Guevara, D. J. Hayes, K. Johnson, H. W. Loescher, F. Paz, Y. Ryu, Z. Sanchez-Mejia and K. P. Toledo-Gutierrez. 2017. Enhancing interoperability to facilitate implementation of REDD+: case study of Mexico. *Carbon Management* 8(1):57-65.
- Wood, J. 2009. Overview of software packages used in geomorphometry. *Developments in Soil Science* 33:257-267.
- Yokoyama, R., M. Shirasawa and R. J. Pike. 2002. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68(3):257-266.