

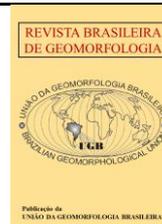


<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 3 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2139>



Artigo de Pesquisa

# Identificación de las geoformas para la cartografía de los geosistemas a nivel local de la cuenca Zirahuén, Michoacán México, con el uso del TPI-BLC SAGA

*Identification of geoforms for the mapping of geosystems at the local level of the Zirahuén basin, Michoacán, Mexico, with the use of the TPI-BLC SAGA*

Julio César García Espino<sup>1</sup>, Gustavo Martín Morales<sup>2</sup> e Manuel Bollo Manent<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Michoacán, de Ocampo, 7 Morelia, México. E-mail: [jgarcia@pmip.unam.mx](mailto:jgarcia@pmip.unam.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6209-0521>

<sup>2</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida, Universidad Nacional Autónoma de México, Yucatán, México. E-mail: [gmartinmorales@gmail.com](mailto:gmartinmorales@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7099-5475>

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Michoacán de Ocampo, 7 Morelia, México. E-mail: [mbollo@ciga.unam.mx](mailto:mbollo@ciga.unam.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-6816>

Recibido: 19/06/2021; Acepto: 09/05/2022. Publicado: 01/07/2022.

**Resumen:** Los geosistemas constituyen un fundamento idóneo para propósitos de planificación, ordenamiento territorial y ambiente. El indicador geomorfológico y la delimitación de morfoelementos son aspectos medulares en la distinción de los geosistemas. El objetivo del trabajo fue individualizar las geoformas de la cuenca Zirahuén con el índice TPI-BLC SAGA para posteriormente cartografiar los geosistemas. La técnica consistió en generar formas del terreno con la herramienta geomorfométrica para clasificar el relieve a partir de los patrones espaciales conformados por la asociación de los polígonos obtenidos semiautomáticamente. Los procedimientos principales fueron la síntesis de la información geomorfológica del área, la selección de los radios, la interpretación de las formas del terreno y la delimitación y clasificación geomorfológica. Se obtuvo la relación entre asociación de formas del terreno y formas del relieve, y la cartografía de las geoformas y los geosistemas. Se demostró la efectividad de la técnica basada en el TPI-BLC para delimitar las geoformas y por tanto para la cartografía de geosistemas. El radio menor está relacionado con los geosistemas de niveles inferiores y el mayor con una superficie representativa de la diversidad geomorfológica del área. Es indispensable la interpretación del producto SAGA sobre la base de un sólido conocimiento geomorfológico del área.

**Palabras claves:** geoformas, radios de vecindad, TPI-BLC SAGA, cartografía de geosistemas

**Abstract:** Geosystems constitute an ideal basis for planning, land use and environmental purposes. The geomorphological indicator and the delimitation of morphoelements are core aspects in the distinction of geosystems. The objective of this work was to individualize the geoforms of the Zirahuén basin with the TPI-BLC SAGA to later map the geosystems. The method consisted of generating landforms with the geomorphometric tool to classify the relief from the spatial patterns formed by the association of the polygons obtained semi-automatically. The main procedures were the synthesis of the geomorphological information of the area, the selection of the radii, the interpretation of the landforms and the geomorphological delimitation and classification. The relationship between the association of landforms and types of relief, and also the mapping of geoforms and geosystems was obtained. The effectiveness of the TPI-BLC based method for delimiting geoforms and thus for mapping

geosystems was demonstrated. The smaller radius is related to lower level geosystems and the larger one to a representative surface of the geomorphological diversity of the area. Interpretation of the SAGA product on the basis of a solid geomorphological knowledge of the area is essential.

**Keywords:** geofoms, neighborhood radii, TPI-BLC SAGA, mapping of geosystems

---

## 1. Introducción

El relieve constituye el principal componente natural a tener en cuenta en la identificación y clasificación de los geosistemas. Solntsev (1962) afirma que el fundamento geólogo-geomorfológico es siempre el factor principal en la diferenciación de los paisajes, por lo que el sistema genético de clasificación de estos debe basarse en dicho componente. Carl Troll en 1963 señaló que los paisajes “están normalmente determinados por la estructura geológica y por el estadio de desarrollo geomorfológico”. El mismo autor le otorgó mayor significación a los aspectos geomorfológicos al momento de distinguir las unidades menores de paisajes (GONZÁLEZ, 2012). Bertrand y Tricart (1968), reconocieron en su estudio que la geomorfogénesis condiciona la dinámica general del geosistema y domina el "sistema de evolución" del paisaje. Bastian et al. (2002) afirmaron que el relieve forma la base de la estructura paisajística, y cuanto más pronunciado es el relieve, más estructurado y dividido es el paisaje, incluso en términos ecológicos. En este sentido Mateo (2011) argumenta el papel del relieve en la redistribución de la radiación solar que origina los procesos geosistémicos en la superficie del planeta como el establecimiento del topoclima, el escurrimiento superficial y el transporte de materia, la pedogénesis, entre otros.

El objetivo fue delimitar las geofomas con el uso del *Topographic Position Index - Based Landform Classification (TPI-BLC)* del *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)*, a partir de las formas del terreno generadas por esta clasificación semiautomática, para la cartografía de los geosistemas de la cuenca Zirahuén a escala 1:50 000. Ello constituye una novedad metodológica pues no se conocen publicaciones de referencia en las que se precisen procedimientos para el análisis geomorfométrico a partir de dicha herramienta, con el fin de representar los geosistemas.

Los paisajes físico-geográficos se han cartografiado como sistemas ambientales, constituyendo la base de investigaciones relacionadas con la planificación y el ordenamiento territorial, con el diagnóstico y evaluación del estado del ambiente a diferentes escalas y la gestión ambiental integrada (BOLLO, 2018). Hasdenteufel et al. (2008) confirmaron que la determinación de los paisajes como sistemas ambientales naturales, puede constituir una base objetiva, y científicamente fundamentada, a partir de la cual puede realizarse un encuentro interdisciplinario y la articulación entre diferentes unidades espaciales y ambientales (cuenca, espacio, territorio).

El área de estudio de este trabajo es la cuenca Zirahuén, en el estado de Michoacán, México. En ella se han manifestado problemas ambientales como el acelerado cambio de uso de suelo forestal por uso agrícola y la reconversión de cultivos tradicionales por cultivos de exportación (ORTIZ, 2017). José et al. (2018) advierten la alteración del ciclo hidrológico y la disminución del acceso al agua a causa del aumento poblacional y de las actividades productivas. Dada su situación ambiental, todos los esfuerzos y estudios del lago Zirahuén relacionados con su conservación y sostenibilidad deben ser fomentados (MENDOZA et al., 2015).

## 2. Área de Estudio

La cuenca Zirahuén se localiza entre los vértices noroeste: 208 713E; 2 157 749N y sureste: 239 015E; 2 142 187N (en metros, zona 14N-UTM). Pertenece al estado Michoacán de Ocampo, México, y ocupa territorios de los municipios Salvador Escalante, Pátzcuaro y Tacámbaro (Figura 1). Tiene una superficie de 273,37 km<sup>2</sup>, según los límites que establece el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2010, b). Su accidente físico-geográfico principal es el lago de origen vulcano-tectónico Zirahuén (VILLASEÑOR, 2005). Situada dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano específicamente en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (ARMIENTA et al., 2008). Su lago se sitúa alrededor de los 2 080 msnm.

La litología predominante es basáltica, con depósitos basáltico-andesíticos del Neógeno (TORRES et al., 2012). Los procesos de formación del relieve son predominantemente endógenos, en este caso volcánicos. El tipo de clima que influye sobre la cuenca es Templado Subhúmedo con la etapa lluviosa en verano -Cwb- (GARCÍA, 2004), pero su extremo oriental, donde se ubican las mayores alturas de la cuenca, las temperaturas son relativamente más bajas y las precipitaciones más altas. En la carta edafológica (INEGI, 1983), se destaca el Andosol como el tipo de

suelo más abundante, con zonas de Litosol localizados hacia las áreas montañosas, y en menor proporción, Feozem, Luvisol y Cambisol. La vegetación primaria remanente se encuentra en las áreas montañosas y lomeríos. Las formaciones vegetales son bosques mesófilos de montaña, y de pinos y encinos mezclados en diferentes proporciones (José et al., 2018). Según la geoinformación generada por el proyecto Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán (Mas et al., 2017), los usos predominantes son agricultura temporal y cultivo permanente, ocupando el 49,6% de la superficie de la cuenca.

Para la cuenca no existe información sobre los geosistemas a nivel local, lo que aunado a la situación ambiental, la cartografía de los paisajes físico-geográficos cobra relevancia.

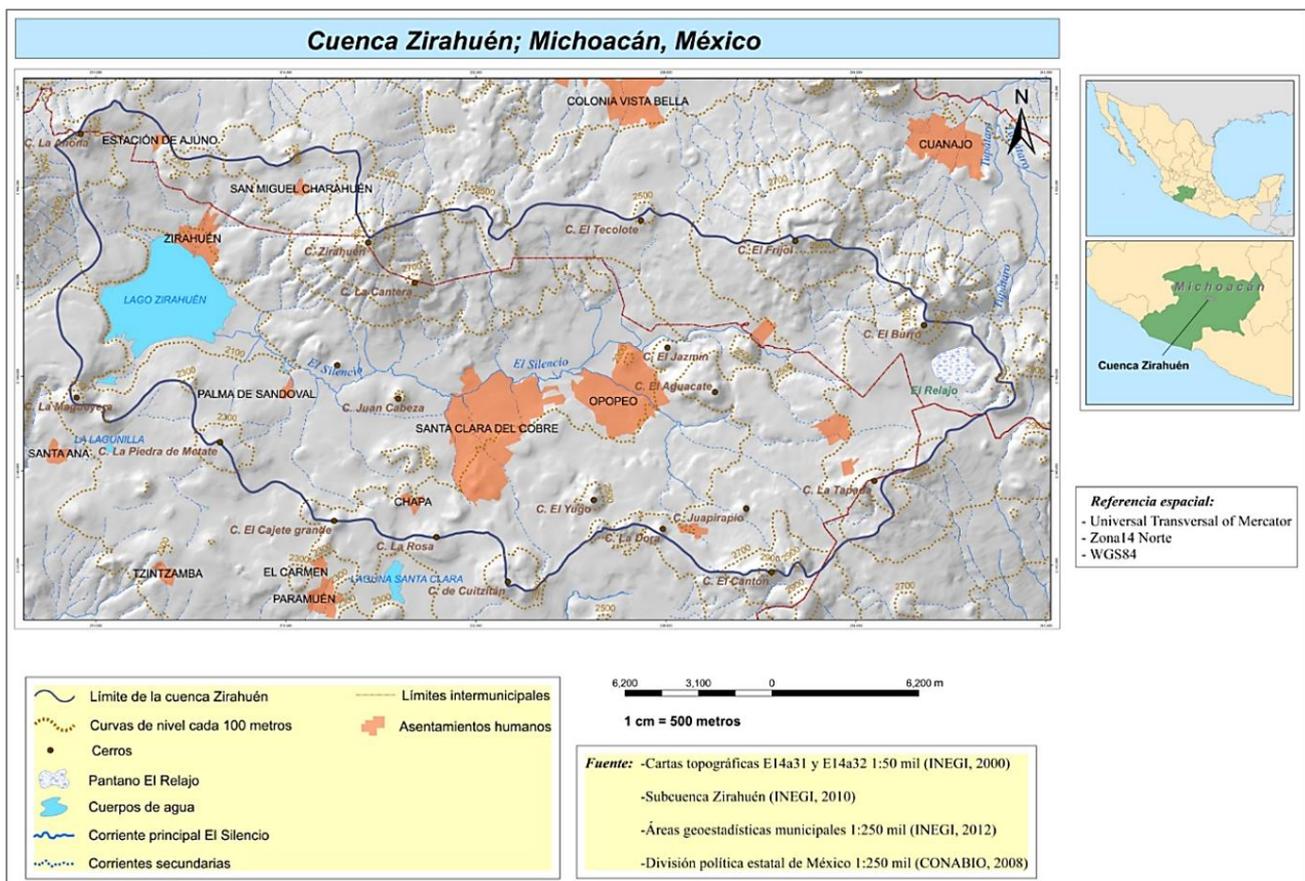


Figura 1. Esquema cartográfico de la cuenca Zirahuén. Elaborada por los autores

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1. Geosistemas o paisajes físico-geográficos

Es necesario aclarar el concepto de paisajes debido a su amplio tratamiento en distintas ramas de la sociedad y la ciencia. En esta investigación se toma como equivalente el término de Geosistema que proviene de la Escuela Rusa de los Paisajes físico-geográficos: "el espacio terrestre de todas las dimensiones, donde todos los componentes naturales individuales se encuentran en una relación sistémica con los demás y, como integridad, interactúan con la esfera cósmica y con la sociedad humana" (SOCHAVA, 1973 en MATEO, SILVA y VICENS, 2015).

Respecto al abordaje de clasificación y cartografía de los geosistemas, es necesario especificar que este trabajo se enmarca en la clasificación tipológica (SOLNTSEV, 1962; ISACHENKO, 1973; MATEO, 2011). Con la tipología de paisajes, las unidades se delimitan a partir de una taxonomía estructurada en una ordenación jerárquica y anidada, en la que los paisajes se identifican sobre la base de elementos indicadores y factores diferenciadores. Estos determinan el comportamiento y distribución de los componentes naturales, dando lugar a áreas relativamente homogéneas (SALINAS ET AL., 2019). Por tanto, los tipos de paisajes pueden repetirse, ya que sus rasgos comunes no son propios ni únicos. La homogeneidad espacial se mide de manera concreta con índices

diagnósticos. En la cartografía a escala grande de los geosistemas (es el caso de la cuenca Zirahuén), la tipología deriva en tres niveles de unidades: localidad, comarca y subcomarca (Tabla 1).

**Tabla 1.** Índices diagnósticos establecidos para la clasificación de los geosistemas de la cuenca Zirahuén

Unidad tipológica físico geográfica	Índices diagnósticos
Localidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Situada en un complejo de mesoformas (positivas y negativas, de 100 a 199 km<sup>2</sup> aprox.)</li> <li>• Similar régimen de humedad</li> <li>• Asociación de litologías originadas por mismo proceso genético</li> <li>• Complejo de suelos vinculados con litologías del complejo de mesoformas</li> </ul>
Comarca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Situada frecuentemente en una mesoforma del relieve (De 10 a 99 km<sup>2</sup> aprox.)</li> <li>• Régimen de humedad homogéneo</li> <li>• Tipos de litologías originadas por mismo proceso genético</li> <li>• Asociación de suelos vinculados con litologías de la mesoforma y sus procesos exógenos</li> </ul>
Subcomarca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Situada en un elemento de la mesoforma (De 10 a 45 km<sup>2</sup> aprox.)</li> <li>• Ingreso homogéneo de calor y luz solar (exposición)</li> <li>• Igual correlación litología-capas de formación de suelos</li> <li>• Humedad homogénea de los suelos</li> <li>• Igual tipo de suelos y cobertura vegetal</li> </ul>

**Fuente:** Modificado por los autores de Vidina (1973), en Mateo (2011). Dimensiones aproximadas de las geoformas: Leontiev y Richagov (1979)

Para delimitar estas unidades primero se aíslan las geoformas, originadas en el proceso de desmembración erosiva del relieve. Este aspecto geomorfológico, constituye el índice diagnóstico primario entre los establecidos para cada nivel de paisaje.

### 3.2. Geomorfometría y geosistemas

El modelo de la mencionada escuela para la clasificación e identificación de las unidades geosistémicas y su cartografía se basa en varios principios, entre ellos el geomorfológico, el cual establece que las formas del relieve constituyen la base para la delimitación de los geocomplejos. Estos principios se enuncian y explican en numerosos textos, algunos de manera parcial, otros aplicados, entre ellos: Isachenko (1973), Bocco et al. (2010), Mateo, (2011), Bastian et al. (2015), Bollo (2018), Salinas et al. (2019), entre otros.

Las entidades espaciales que expresan el relieve son las geoformas, que como define López (1994) se refiere a todos los aspectos que tienen que ver con la morfología de la superficie terrestre (volumen, forma y longitud de pendientes; tipo y densidad del patrón de drenaje; etc.). Para identificar y cartografiar las geoformas, es necesario, como indican Priego et al. (2010), describirlas y tipificarlas utilizando índices geomorfométricos, lo que permite caracterizarlas en términos cuantitativos.

Los índices más comunes son la hipsometría, la amplitud de relieve, la inclinación y orientación de la pendiente, entre otros. Estos índices en la actualidad se calculan de forma automática con las herramientas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de los modelos digitales de elevación (MDE). Entre los trabajos en occidente que se destacan en las primeras etapas de desarrollo de la clasificación automatizada de las formas del relieve se consideran: Hammond (1954), Pike (1988), Skidmore (1990), Dikau et al. (1991), y Brabyn (1998), y recientemente Petsch et al. (2020) entre otros.

En la actualidad, tanto la delimitación de las geoformas como la cartografía de los geosistemas se hacen de manera semiautomática con la ayuda de los SIG. En el caso de los análisis geomorfométricos, SAGA es uno de los programas útiles por sus paquetes de herramientas destinadas al análisis y modelación a partir de la geoinformación topográfica.

### 3.3. Formas del terreno generadas por SAGA y su herramienta TPI-BLC.

SAGA es uno de los SIG que en la actualidad ofrece un gran número de funciones geomorfométricas basadas en MDEs. Comenzó a desarrollarse en el 2001 en la Universidad de Gottingen, Alemania y se dio a conocer en 2004 (OLAYA; CONRAD, 2009). El índice TPI-BLC fue creado por Conrad en 2011 (SAGA, 2019). Su lógica se basa en los trabajos de Guisan, Weiss y Weiss (1999), quienes propusieron el TPI como una técnica para generar información de la variable altura relativa, con fines de modelar la distribución de especies de flora. Asimismo, Conrad usó para desarrollar la herramienta TPI-BLC, los trabajos de Gallant y Wilson (2000) en el que aplican un cálculo de TPI similar al creado por Guisan, Weiss y Weiss (1999). Otro antecedente fundamental en la creación del TPI-BLC es la herramienta de Análisis de Formas del Terreno de Weiss (2001). Es importante reconocer que TPI y TPI-BLC son dos herramientas distintas, aunque muy relacionadas.

Con TPI, se calcula para cada celda de un ráster de elevación, la diferencia de altura entre su valor y la media de los píxeles que le rodean, siendo el punto central la celda de interés. Dicho de otra manera, muestra la relatividad de la cota de un punto en relación con las circundantes, restringidas a un área geométrica de extensión variable. Si la altura del píxel central es menor que la media que le rodea, su valor es negativo; si es más elevada, su valor es positivo. La herramienta TPI-BLC es algo más compleja, ya que no solo se centra en la posición topográfica relativa, sino que clasifica de manera continua la superficie en formas del terreno. Esto se logra comparando la elevación de un píxel con la media de dos conjuntos de celdas circundantes. La primera comparación se hace con la altura media de un área geométrica pequeña y la segunda con una mayor. Tales distancias del píxel central al borde de las áreas de inclusión (conjunto de píxeles para el cálculo de la altura media) se denominan radios de vecindad o tamaño de ventana. Como explican Tagil y Jenness (2008), un píxel puede pertenecer a un valle pequeño en una cima extensa o meseta alta, si su valor de TPI es negativo en comparación con la altura media de un área circundante de radio pequeño, y positivo respecto a un radio grande. Al contrario, si el píxel es positivo al compararlo con la elevación media dentro de un radio pequeño y negativo para un radio grande posiblemente esté representando una colina pequeña en un valle extenso.

La herramienta en cuestión analiza la variable pendiente, y las categorías finales en las que queda clasificada la superficie, se definen asociando los patrones de las geoformas según su manifestación natural, a ciertas combinaciones de posición topográfica e inclinación. Como la variable elevación tiende a estar autocorrelacionada espacialmente, el rango de valores del TPI aumenta con la extensión del área (Figura 3). En el algoritmo desarrollado por Weiss (2001) para identificar las formas del terreno (Figura 2), primero se estandarizan los valores obtenidos por el TPI en cada celda sobre una media igual a 0 y desviación estándar igual a 1. Esto permite utilizar las mismas ecuaciones básicas para clasificar cualquier combinación de TPI con extensiones radiales distintas.

```

/* First, standardize the TPI grids using the formula:
/* tpi<sf>_stdi = int((((tpi<sf> - mean) / stdv) * 100) + 0.5)

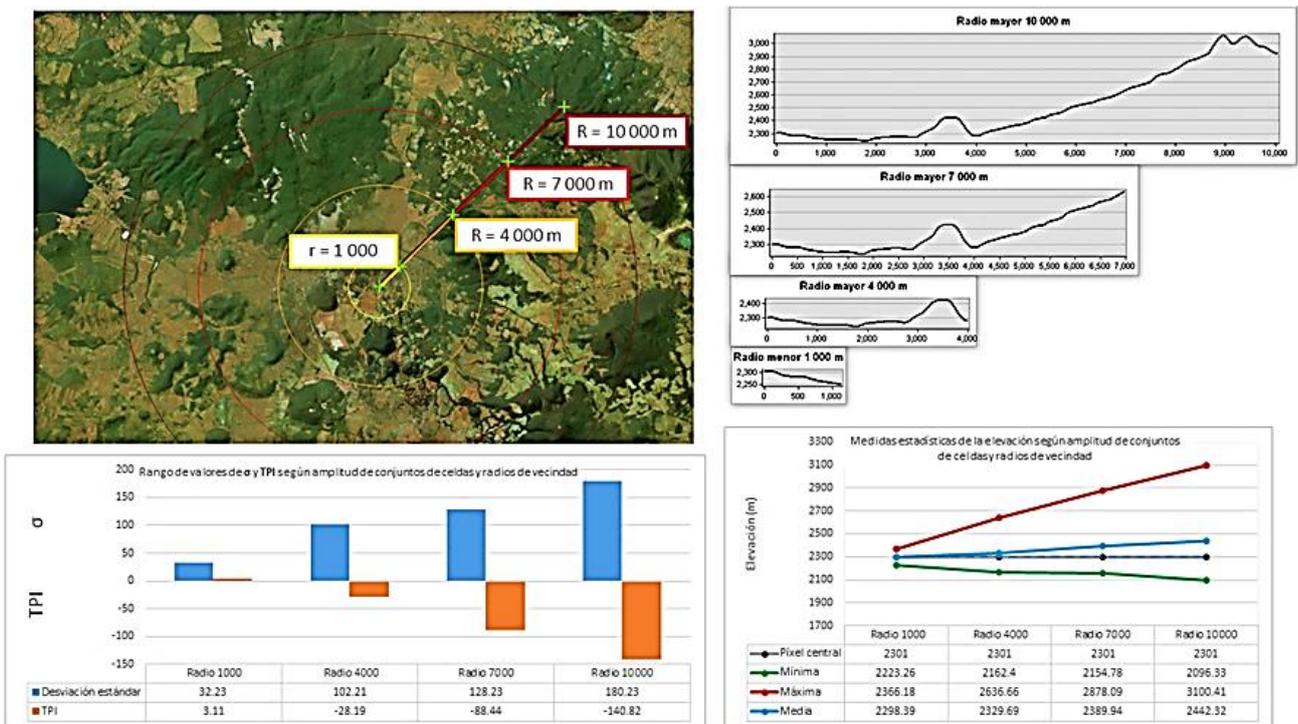
tp300_std = int((((tp300i - 0.399) / 7.566) * 100) + .5)
tp2000_std = int((((tp2000i - 0.346) / 89.435) * 100) + .5)

/* Then classify the plane in Fig 4a by 1 stdv units (= 100 grid value units),
and check /* the slope for the central zone:

if (tp300_std > -100 and tp300_std < 100 and tp2000_std > -100 and \
    tp2000_std < 100 and slope_deg <= 5) lf300x2k = 5
else if (tp300_std > -100 and tp300_std < 100 and tp2000_std > -100 and \
    tp2000_std < 100 and slope_deg >= 6) lf300x2k = 6
else if (tp300_std > -100 and tp300_std < 100 and tp2000_std >= 100) \
    lf300x2k = 7
else if (tp300_std > -100 and tp300_std < 100 and tp2000_std <= -100) \
    lf300x2k = 4
else if (tp300_std <= -100 and tp2000_std > -100 and tp2000_std < 100) \
    lf300x2k = 2
else if (tp300_std >= 100 and tp2000_std > -100 and tp2000_std < 100) \
    lf300x2k = 9
else if (tp300_std <= -100 and tp2000_std >= 100) lf300x2k = 3
else if (tp300_std <= -100 and tp2000_std <= -100) lf300x2k = 1
else if (tp300_std >= 100 and tp2000_std >= 100) lf300x2k = 10
else if (tp300_std >= 100 and tp2000_std <= -100) lf300x2k = 8
endif
    
```

**Figura 2.** Planteamiento en lenguaje de programación informático de la herramienta de Análisis de Formas del Terreno de Weiss (2001)

Para cada píxel, el programa combina los valores estandarizados de los conjuntos de ambos radios junto a su pendiente, ubicándolo en un rango de -100 (como referencia de valores máximos negativos) a 100 (como referencia a valores máximos positivos). Son 10 posibles situaciones planteadas, que el programa resuelve para determinar el valor de cada píxel -vinculado con las 10 posibles formas del relieve que ofrece como salida el programa-. En el ráster generado, los valores negativos representan depresiones o valles; y positivos crestas o picos; pasando por valores próximos a cero (pendientes muy abruptas, áreas planas y sillas). En el caso de los valores cercanos a cero, son superficies planas o cuya pendiente es constante, tanto de forma aguda o plana; o sea, cuando las pendientes son cercanas a cero o a 90° y se comportan en gradiente espacial constante.



En este sentido, Tagil y Jenness (2008), explican que TPI-BLC provee más información de las formas del relieve que el TPI por sí solo, y por tanto pueden identificarse geformas más complejas. Con la herramienta del programa SAGA, TPI-BLC, la superficie queda clasificada en 10 categorías. Para sus nombres en español se tuvo en cuenta la

traducción literal, el conocimiento geomorfológico y el tratamiento de dichas clases en artículos en idioma español. Las categorías se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Equivalencia entre las clases y simbología de *TPI-BLC SAGA* con la representación asignada en *ArcGIS*. Elaborada por los autores

Clase <i>TPI-BLC SAGA</i>	Nombre de las clases <i>TPI-BLC SAGA</i>	Valor celda <i>TPI-BLC SAGA</i>	Traducción de la categoría	Color y clase en <i>ArcGIS</i>
I	High Ridges	9	Cumbres	9
II	Midslope Ridges	8	Cimas de pendiente media	8
III	Local Ridges	7	Cimas aisladas	7
IV	Upper slopes	6	Laderas altas	6
V	Open Slopes	5	Laderas abiertas	5
VI	Plains	4	Llanos	4
VII	Valleys	3	Valles U	3
VIII	Upland Drainages	2	Cabeceras de arroyos	2
IX	Midslope Drainages	1	Cañadas de pendiente media	1
X	Streams	0	Cañadas y corrientes encajadas	0

### 3.4. Materiales

Los SIG utilizados fueron *ArcGIS* 10.3.1 (*ArcMap*, *ArcScene* y *ArcCatalog*) y *SAGA* 7.2.0. Para las modelaciones geomorfométricas, lo primero fue asegurar que los datos referentes a la topografía tuvieran la resolución espacial requerida. Para la cartografía de los geosistemas, además del relieve, es indispensable contar con geoinformación de los otros componentes biofísicos como el clima o sus variables diferenciadoras, la litología, el suelo, los elementos hidrológicos y la cubierta vegetal (Tabla 3).

**Tabla 3.** Geoinformación utilizada como insumo para la cartografía de los geosistemas de la cuenca Zirahuén. Elaborada por los autores

Geoinformación	Fuente	Escala
MDE	Generado con la herramienta <i>ArcGIS Topo to raster</i> Resolución espacial 10 m	1:50 000
Curvas de nivel	INEGI, 2000	1:50 000
Cuerpos de agua	INEGI, 2000	1:50 000
Geoformas	Generado con la herramienta <i>TPI-BLC SAGA</i>	1:50 000
Variables climáticas	Precipitaciones en temporada húmeda y seca; Temperaturas en temporada húmeda y seca E14-1 (INEGI, 1988)	1:250 000
Litología	Cartas geológicas E14a31, E14a32 (Dirección General de Estudios del Territorio Nacional, -DGETN-, 1978)	1:50 000
Suelos	Cartas edafológicas E14a31, E14a32 (Dirección General de Geografía -DGG-, 1983)	1:50 000

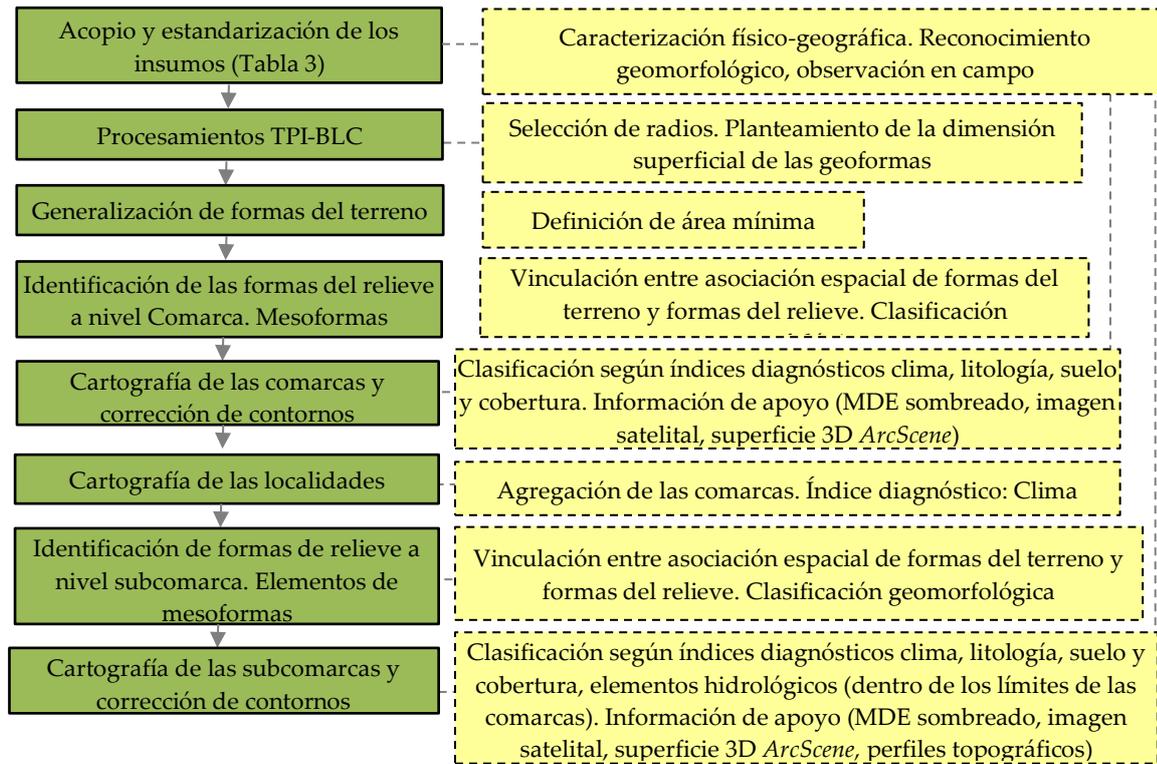
Elementos hidrológicos	Red hidrográfica y dirección de flujo. Cuencas RH12Ga, RH12Gb, RH18Ha, RH18Ld, RH18Le (INEGI 2010, a)	1:50 000
Cobertura y vegetación	Generada por el proyecto de investigación Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán (Mas et al., 2017)	1:50 000
Imagen satelital	Sentinel, sensor MSI-2B. 15-04-2019, Bandas espectro visible 2 (azul), 3 (verde), 4 (rojo) Composición color real. Resolución espacial 10 m	-
Límite de la cuenca	INEGI, 2010, b	1:50 000

### 3.5. Procedimientos y pasos para la delimitación de las geoformas

Esta técnica para la delimitación de las geoformas de manera semiautomática y su uso como base espacial para los geosistemas se sintetiza en la figura 4. Lo ideal es comenzar con un reconocimiento del área de estudio, que permita comprobar y actualizar la información geomorfológica obtenida en la etapa de gabinete.

Para comenzar con los procesamientos, es necesario analizar la asignación de valores de Radios de vecindad ya que los parámetros que establece la herramienta son Radio pequeño (Rp), Radio grande (Rg), y Función de ponderación de distancia (Fp). Pocas publicaciones explican los factores a tener en cuenta para la selección de los valores de radios, pero hay un acuerdo en que los mayores representan mejor los rasgos del relieve más grandes, y los radios pequeños, los menores (DEUMLICH, SCHMIDT y SOMMER, 2010; GENCHI, et al., 2011; REU et al., 2013). Esta proporción la plantearon Gallant y Wilson (2000) quienes explican que cuando el tamaño de ventana es similar al de las laderas, la desviación estándar refleja el relieve local; y cuando es mucho mayor, mide la rugosidad del paisaje de forma menos detallada. Tal razón se tomó en cuenta como criterio para la asignación del valor del radio mínimo (Tabla 3), sobre la base de su correspondencia con el área aproximada de los polígonos de los geosistemas de nivel más bajo.

También como criterio para asignar el valor de radio mayor, se tomó en cuenta un área representativa de la diversidad topográfica de la cuenca, en términos de inclusión de contrastes entre tipos de relieve y de un mayor alcance posible. En el cálculo de la categoría de la forma del terreno a la que pertenece cada celda, el algoritmo de la herramienta emplea la altura media de cada conjunto de píxeles. Por tanto, el radio mayor debe abarcar una superficie que contenga una variedad geomorfológica representativa con la cual se compare la altura media del conjunto de celdas de radio menor. De esta manera, la categoría calculada para cada celda reflejará la comparación de sectores pequeños respecto a áreas representativas del territorio total. Otro factor considerado fue el balance entre el alcance del radio (y por ende el tamaño del conjunto de celdas a incluir en el cálculo) y la capacidad de procesamiento del equipo computacional, lo que se traduce en velocidad, duración y éxito de la modelación.



**Figura 4.** Esquema metodológico para la delimitación de las geoformas con *TPI-BLC SAGA* y la cartografía de geosistemas. Elaborada por los autores

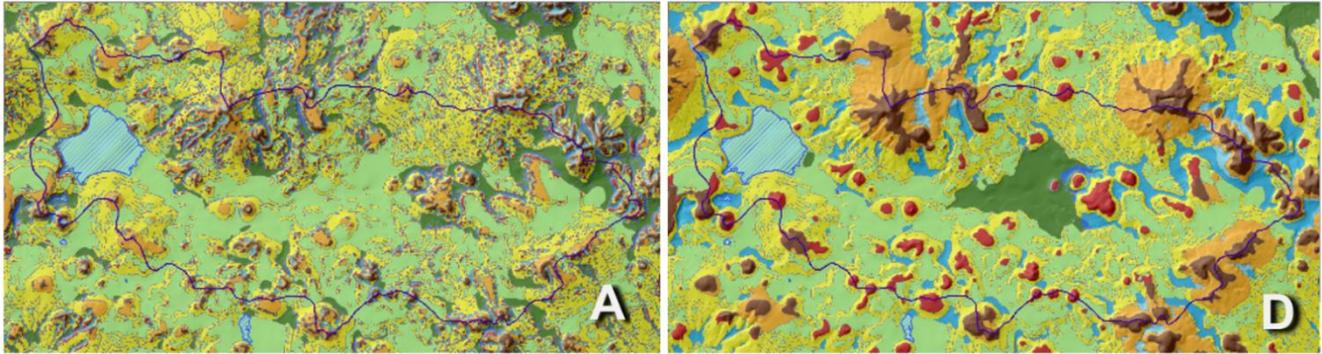
Se realizaron cuatro procesamientos con diferentes valores de radio (Tabla 3). Para el ejemplo comparativo se expone la representación esquemática de dos procesamientos (Figura 5).

**Tabla 3.** Procesamientos y criterios establecidos para asignar valores al parámetro Radios de vecindad.

Procesamiento	(r)	Criterio	(R)	Criterio
A	100	Por defecto	1000	Por defecto
B	300	Presentado por Weiss (2001)	2000	Presentado por Weiss (2001)
C	600	Área mínima de facie*	10 000	Área representativa de la diversidad topográfica
D	1000	Área mínima de subcomarca	10 000	Área representativa de la diversidad topográfica

\*La facie es la unidad inferior a la subcomarca. Valores de radios en metros (unidades del mapa). Elaborada por los autores

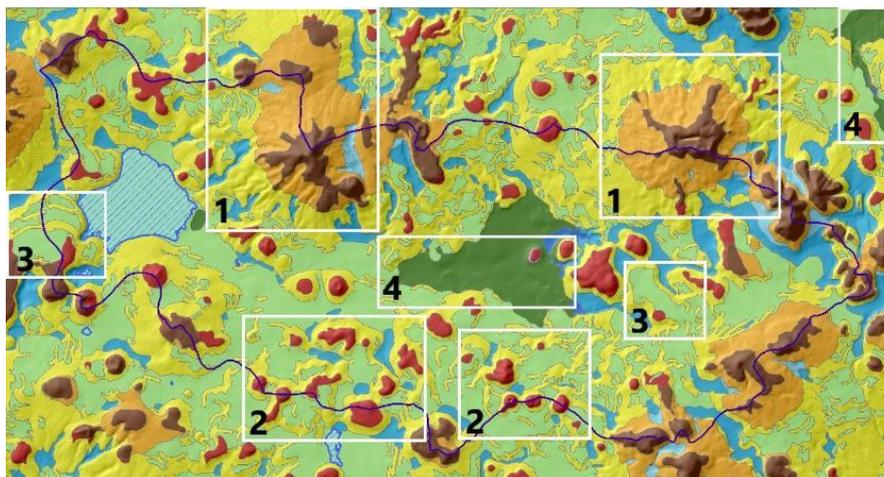
El producto bruto de la aplicación del *TPI-BLC* es un nuevo ráster con cifras de enteros para la eficiencia de almacenamiento y la simbolización. La herramienta genera capas de celdas de extensión “.sdar”. Estas se convirtieron a un formato ráster compatible con ArgGis (“.tiff”) y de tipo “entero”. Con el fin de trabajar con polígonos independientes, se realizó la conversión de ráster a vector. Luego se asignó una paleta de colores a las categorías de formas del terreno (Tabla 2), acorde al tipo de fenómeno y su gradiente espacial. En el caso del relieve, una gradación desde verde para zonas llanas a pardo marrón para cumbres; y azul para fenómenos hidrológicos. A continuación se efectuó la generalización eliminando los polígonos menores al área mínima cartografiable (0,06 km<sup>2</sup>) y la suavización de contornos con la herramienta Polígono Suavizado y la subsiguiente revisión topológica.



**Figura 5.** Esquema de la geoinformación generada por los procesamientos de la herramienta *TPI-BLC SAGA* a partir del Fuente: MDE de la cuenca Zirahuén. Nota: Colores correspondientes a simbolización asignada en *ArcGIS*. Elaborada por los autores

Luego de identificar semiautomáticamente las áreas y contornos de las formas del terreno, prosiguió clasificarlas geomorfológicamente. Este paso solo es posible acometerlo con un conocimiento geomorfológico riguroso del área de estudio. Es necesario entender los procesos genéticos del relieve, las fuerzas endógenas que intervinieron en su formación y provocaron el último rejuvenecimiento, desde el cual han actuado los agentes exógenos que modelaron las formas que hoy definen la superficie de la cuenca. En el caso del área de estudio se tomó en cuenta la información disponible sobre aspectos geólogo-geomorfológicos, los textos básicos y tesis sobre geomorfología volcánica de México, y las valoraciones en los recorridos de campo. El origen de la cuenca es predominantemente volcánico, por lo tanto, las formas del terreno semiautomáticas fueron analizadas teniendo en cuenta los procesos volcánicos y erosivo-acumulativos.

Ya con la información y conocimientos geomorfológicos del área de estudio, se pudieron relacionar los patrones y asociaciones espaciales de las categorías *TPI-BLC SAGA* con un origen y tipo geomorfológico (Figura 6, Tablas 4 y 5).



**Figura 6.** Ejemplos de las formas del terreno generadas por el procesamiento D con *TPI-BLC SAGA* y sectores representativos de las mesoformas. Leyenda: 1. Montañas volcánicas, 2. Lomeríos volcánicos, 3. Superficies de coladas volcánicas, 4. Sectores del Valle intramontano. Elaborada por los autores

Los contornos finales para las mesoformas se corrigieron a partir de la información brindada por el MDE sombreado, la imagen satelital, superficie 3D *ArcScene*, el mapa de pendientes y las curvas de nivel. En el caso de las montañas, se tuvo en cuenta como información de decisión la amplitud altitudinal base-cima. Para ello se creó una capa con polígonos asociados a cada elevación (en planta). Se le asignó a cada polígono el valor de amplitud de altura con el uso de la herramienta *ArcGIS* Estadísticas zonales como tabla/Rango y luego una Unión entre los valores de la tabla y las entidades poligonales. Aquellos polígonos menores de 300 m de amplitud no fueron

catalogados como montañas. Para delimitar estas mesoformas otra información de apoyo también fue la clasificación altimétrica de Hernández, Ortiz y Figueroa (2009).

Para el valle intramontano se consideró la distribución de los depósitos aluviales y la falla normal noreste-sureste. En el caso de las coladas volcánicas se analizó además la información sobre dirección y sentido de flujos lávicos que aparece en las cartas geológicas de INEGI (1978), y los patrones en las pendientes (frangas con valores altos de inclinación en las zonas de escarpes de lava). Nótese la ausencia de las categorías 0, 1 y 2, que relacionadas con el fenómeno hidrológico se distribuyen en la franja de adyacencia entre las mesoformas, asociadas a cañadas y monturas, o en la base de elevaciones, ya que por concepto indican canales de drenaje en zonas altas y sectores de origen aguas arriba.

### 3.6. Delimitación de comarcas, localidades y subcomarcas

En los índices diagnósticos de la clasificación tipológica a escalas detalladas (Tabla 1), las mesoformas están directamente relacionadas con las comarcas; por tanto, se decidió identificar primeramente este nivel taxonómico. Prosiguió vincular las formas del relieve con la asociación espacial de formas del terreno (Tabla 4). Seguidamente se sintetizó la información relativa a los demás índices diagnósticos: régimen de humedad, litología, suelos y cobertura. Las comarcas se componen por los tipos litológicos, suelos y cobertura vegetal predominantes en la geoforma asociada a cada nivel taxonómico de paisajes.

El procedimiento para delimitar las localidades no demandó otros procesamientos de la herramienta *TPI-BLC*, ya que estas se constituyeron por agregación de las comarcas. El índice diagnóstico que evidenció la diferenciación a este nivel fue las precipitaciones medias, tanto en época seca como lluviosa. En el caso de las subcomarcas, primero se reconocieron en la etapa de gabinete las formas del relieve que debían encontrarse anidadas en las mesoformas. Luego se vincularon con las categorías generadas por *TPI-BLC* (Tabla 5) respectivas a los elementos de la mesoforma. El valle identificado por *TPI-BLC* es equivalente por extensión y distribución al valle intramontano, correspondiente a una comarca en la taxonomía tipológica. Ante la necesidad de aislar una subcomarca conformada por la llanura de inundación, se recurrió a la herramienta SIG Valley Bottom Extraction Tool (V-BET). Los creadores de V-BET, Gilbert, Macfarlane y Wheaton (2016), facilitaron este algoritmo compatible con *ArcGIS* como una caja de herramientas de código abierto. Se basa en el principio de que la disposición de las pendientes determina los límites del fondo de los valles fluviales, el cual está fuertemente relacionado también con el área drenada y la localización del sector del cauce dentro de la cuenca. Se hizo otro procesamiento con valores de parámetros (pendientes, ancho y drenaje acumulado) representativos de las cárcavas aguas arriba. Su objetivo fue obtener una capa de polígonos para usarla a modo de completamiento o corrección de los límites de los elementos hídricos generados por *TPI-BLC*. En muchos casos, los polígonos de las clases 0 y 1 eran notablemente mayores que las cárcavas y arroyos, por lo que se recurrió a los contornos de los polígonos generados por la herramienta V-BET.

Con el objetivo de reajustar los contornos de los elementos de las mesoformas como base espacial para las subcomarcas, se tomó como referencia la siguiente información: el MDE sombreado, la imagen satelital, superficie 3D *ArcScene*, el mapa de pendientes, las curvas de nivel, los perfiles topográficos creados (herramienta 3D Análisis de *ArcGIS* / Gráfico de perfil), la información sobre aparatos volcánicos de las cartas geológicas de INEGI (1978) y la distribución de tipos de rocas. Cabe mencionar que tales morfoelementos también se generalizaron por el principio del área mínima cartografiada. Con los elementos de las mesoformas delimitados (base espacial de las subcomarcas) y clasificadas geomorfológicamente (Tabla 5), se sintetizó la información relativa a los índices diagnósticos: litología, suelo y cobertura. El régimen de humedad se heredó de las comarcas y localidades. Estos fueron atribuidos a cada unidad según el principio de predominancia. De esta manera, los contornos de las subcomarcas quedaron enmarcados dentro de los límites de las comarcas (unidad inmediata superior). Los últimos procedimientos se destinaron al diseño cartográfico, y la tarea final fue la comparación de los mapas con la realidad mediante trabajo de campo.

## 4. Resultados

La modelación seleccionada fue la D, cuyas formas del terreno generadas tuvieron dimensiones similares a las mesoformas, elemento geomorfológico que articula los índices diagnósticos para los geosistemas a escala grande. En ella el menor radio es proporcional en promedio a la menor área ( $r=1$  km,  $\bar{A}=3,14$  km<sup>2</sup>) de las geoformas

indicadoras de las subcomarcas (unidad de paisaje menor a identificar) como algunas cumbres, piedemontes y llanos. Para el radio mayor se estimó que 10 kilómetros permitía abarcar una diversidad de características del relieve suficiente (valle intramontano - lomerío - montaña) y a su vez, garantizar la ejecución exitosa del procesamiento computacional.

Las mesoformas a delimitar fueron clasificadas geomorfológicamente en cuatro: montañas volcánicas, lomeríos volcánicos, superficies de coladas volcánicas y valles intramontanos erosivo-acumulativos (Tabla 4). A partir de la salida seleccionada y en el caso de las mesoformas (que dan lugar a las comarcas), puede observarse que las montañas volcánicas se caracterizan por la asociación de cumbres y laderas altas (categorías 9 y 6). Los lomeríos volcánicos se distinguen por la combinación de las cimas de pendiente media y laderas abiertas (8 y 5), intercaladas por llanos (4). Las superficies de coladas volcánicas se reconocen por un patrón de llanos bordeados por laderas abiertas (4 y 5); y los valles intramontanos, por llanos y valles en U (3) distribuidos entre las demás mesoformas y asociados a la red hidrográfica o a fallas (en el caso del sector de valle de origen tectónico).

**Tabla 4.** Relación entre las mesoformas clasificadas geomorfológicamente y las formas del terreno SAGA. Los caracteres destacados con fuente Negrita se refieren a las formas del terreno más representativas que dan lugar a dichas mesoformas. Elaborada por los autores

Mesoformas	Principales formas del terreno SAGA asociadas
Montaña	5 + 6 + 8 + 9 Laderas abiertas, <b>laderas altas</b> , cimas de pendiente media y <b>cumbres</b>
Valle intramontano	3 + 4 + 5 <b>Valle U, Llanos</b> y laderas abiertas
Superficie de coladas volcánicas	4 + 5 + 6 + 8 + 9 <b>Llanos, laderas abiertas</b> , laderas altas, cimas de pendiente media y cumbres
Lomerío volcánico	4 + 5 + 7 + 8 + 9 <b>Llanos, laderas abiertas</b> , cimas aisladas o colinas, <b>cimas de pendiente media</b> y cumbres

En la tabla 5 se muestra el vínculo entre la asociación espacial de formas del terreno y los tipos geomorfológicos según origen y procesos modeladores al interior de las comarcas (elementos de las mesoformas que dan lugar a las subcomarcas).

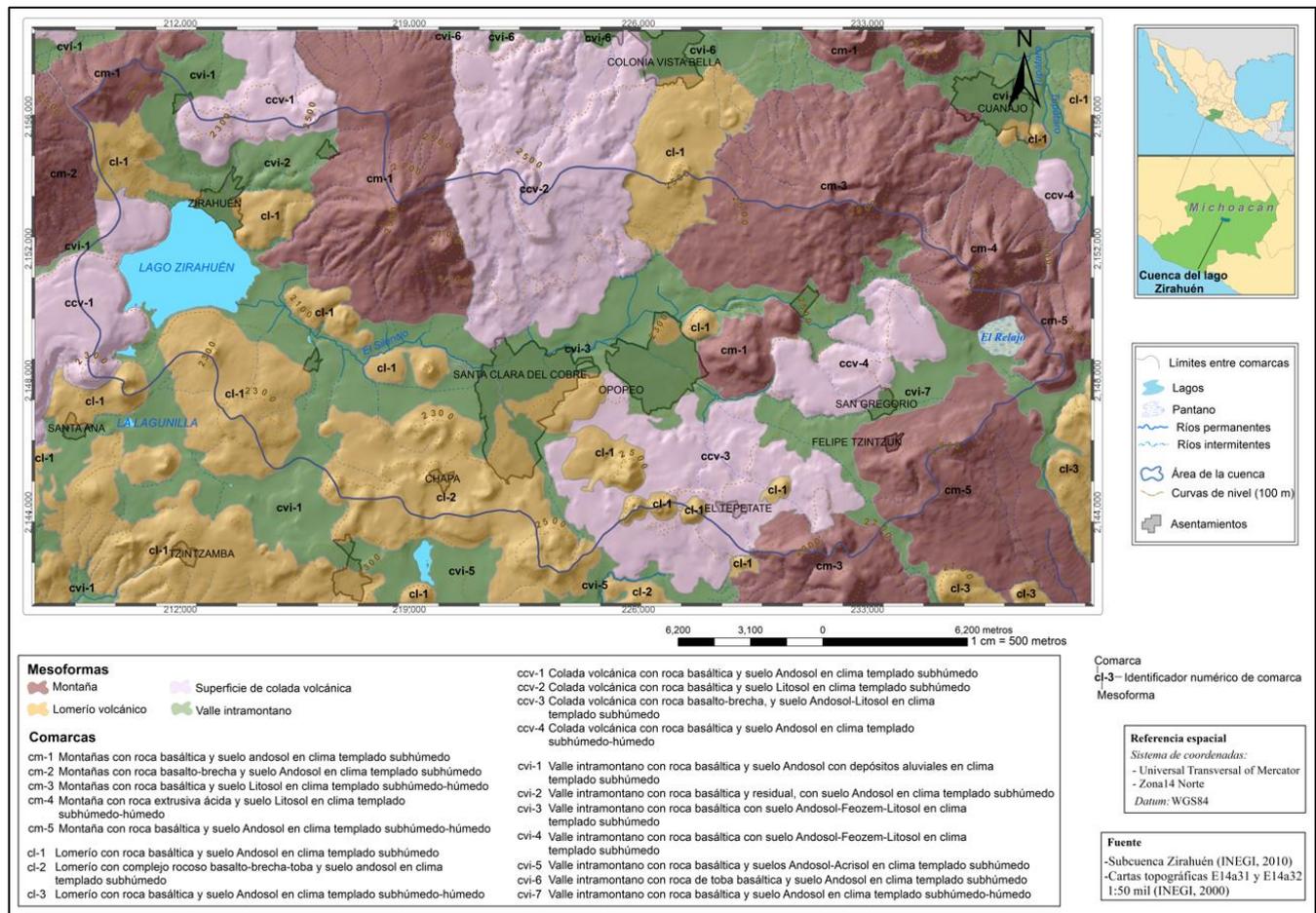
**Tabla 5.** Categorías TPI-BLC SAGA, elementos de las mesoformas clasificadas geomorfológicamente y subcomarcas asociadas. Elaborada por los autores

Formas del terreno TPI-BLC SAGA	Mesoformas que dan lugar a comarcas			
	Montañas	Lomerío	Colada volcánica	Valle
	<b>Elementos de las subcomarcas anidados al interior de las mesoformas</b>			
0, 1	Cañadas	Cañada o cauce	Cañada o cauce	Valle basal, cauce, cañada
3	-	-	-	Llanura de inundación Complejo de terrazas y relieve residual
4	Piedemonte (sector)	Llano	Llano de lava Explanada lávica	Llanura de inundación Complejo de terrazas y relieve residual Valle basal Margen fluvio-lacustre
5	Piedemonte	Ladera baja	Escarpe de lava	Complejo de terrazas y relieve residual
6	Ladera alta	Ladera alta	Explanada lávica	-
7	-	Cono volcánico Cerro volcánico	-	-
8	Cima aplanada	Cono volcánico Cerro volcánico	Crestas lávicas	-

9	Cumbre	Cono volcánico Cerro volcánico	Crestas lávicas	-
---	--------	-----------------------------------	-----------------	---

Se identificaron 19 comarcas (Figura 7), cuya agregación resultó en el mapa de localidades físico-geográficas (Figura 8). La cartografía de las subcomarcas fue la más laboriosa, con la mayor cantidad de polígonos y contornos a revisar (Figura 9). Es necesario aclarar, que la cartografía de este trabajo se concibió para formato impreso, con dimensiones 841 x 594 cm (plantilla *ArcGis*, ISO A1, *Landscape.mxd*)

**Figura 7.** Mapa de mesoformas y comarcas de la cuenca Zirahuén cartografiadas a partir de la herramienta *TPI-BLC SAGA*. Elaborada por los autores

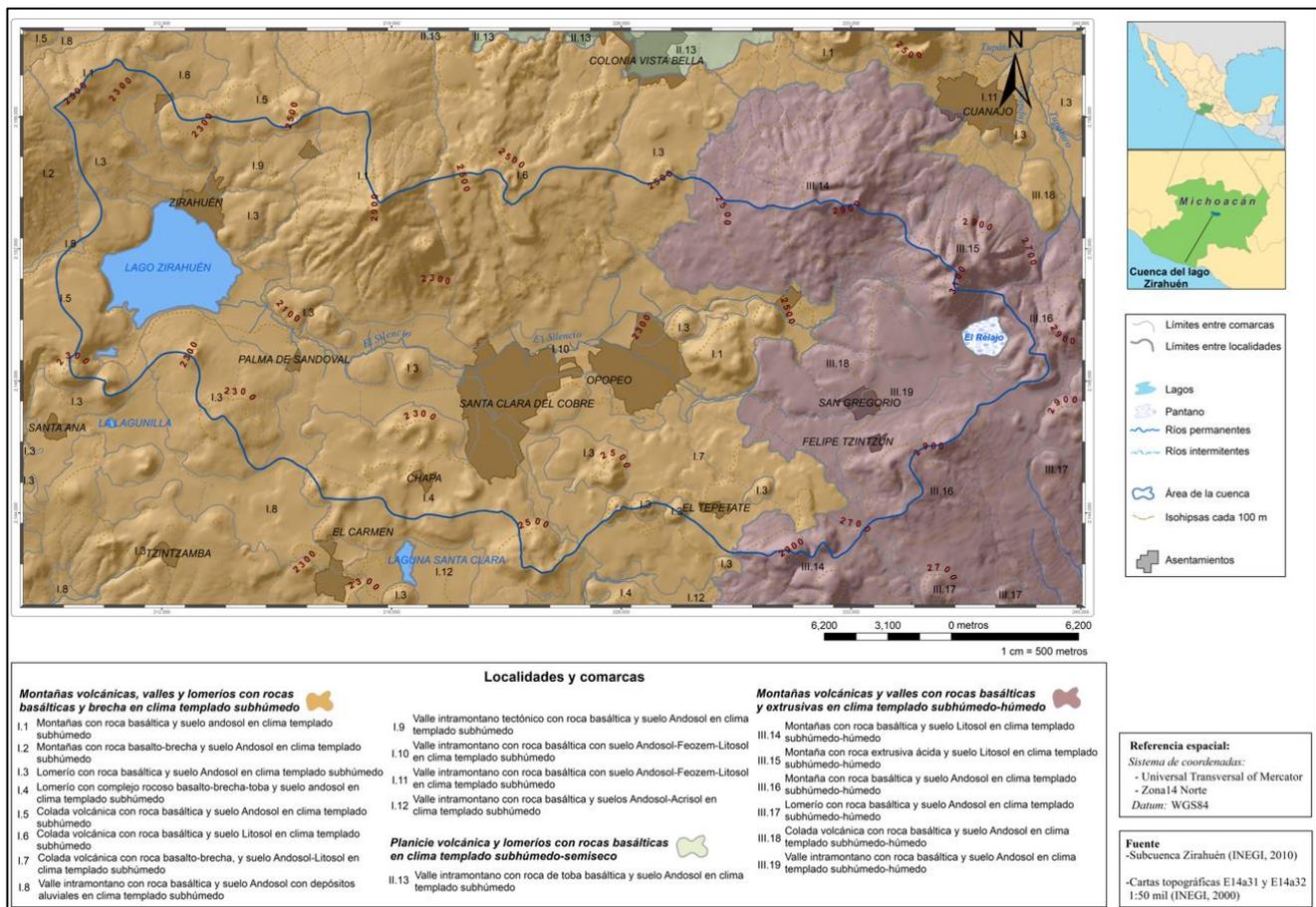


#### 4. Discusión

Es importante no tratar una forma del terreno generada automáticamente con *SAGA* tal y como una forma clasificada geomorfológicamente. Aquella es un producto automático, una de 10 clases independientemente de la génesis y los procesos modeladores del relieve. Este producto informático por sí solo no transmite la diversidad geomorfológica natural.

Los contornos y polígonos *per se* que genera la herramienta no constituyen directamente la base espacial de los geosistemas. Estas formas del terreno son elementos geométricos cuyas relaciones topológicas deben ser analizadas y modificadas en ciertos casos. A los polígonos resultantes pertenecientes a las 10 categorías, el investigador debe generalizarlos en ocasiones, desagregarlos en otras, y darles una clasificación geomorfológica. Es importante destacar que el aporte más significativo de la herramienta es el contorno de las formas del terreno, puesto que el programa marca los límites a partir de criterios geomorfométricos, y establece el contraste en la topografía definiendo hasta dónde llega una forma y comienza otra. Así queda clasificado el espacio de manera continua y luego el usuario debe darle explicación y uso a esa salida semiautomática.

**Figura 8.** Mapa de localidades de la cuenca Zirahuén, cartografiadas a partir de la herramienta *TPI-BLC SAGA*. Elaborada por los autores



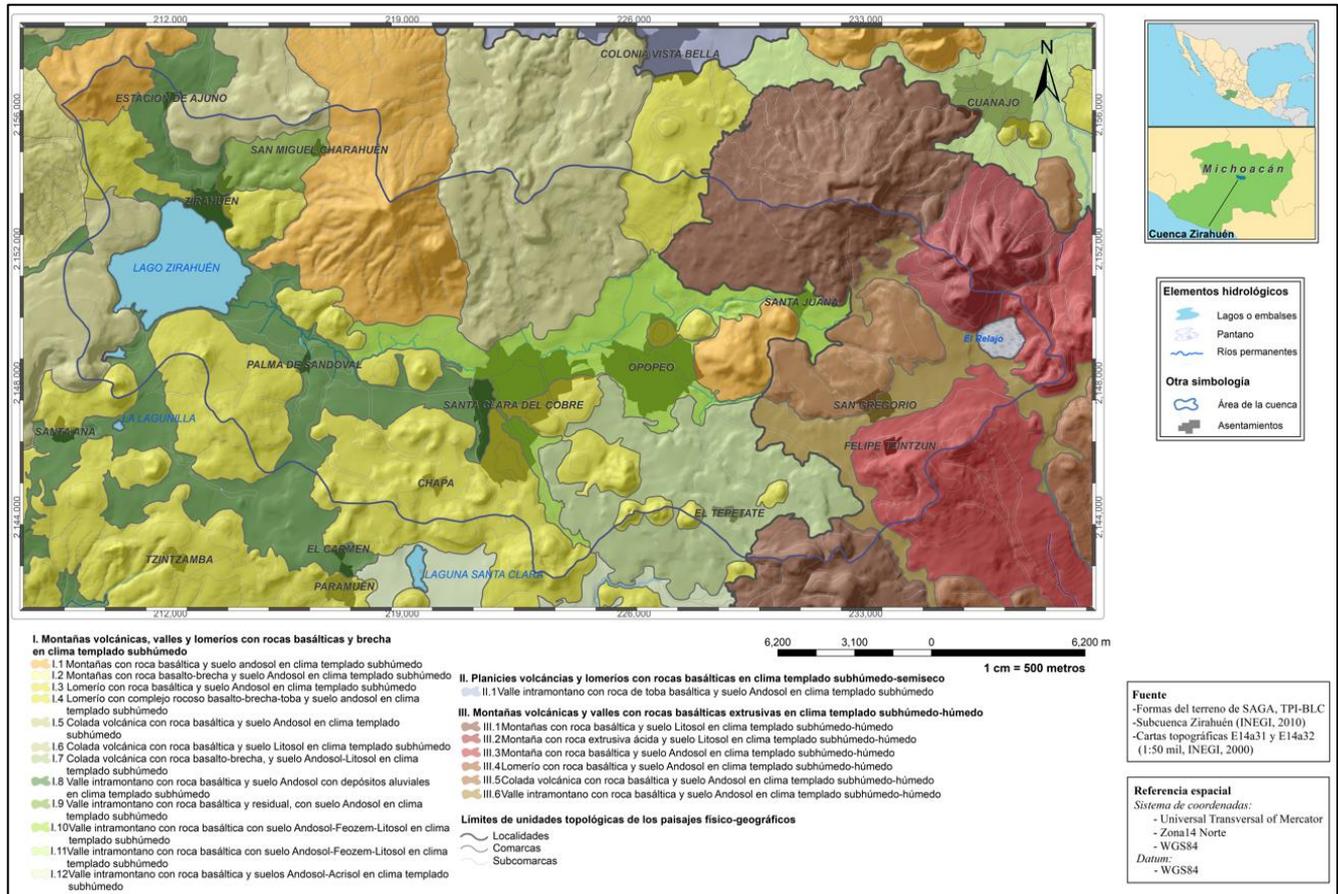
La selección de los radios de vecindad constituye un paso determinante porque define la magnitud espacial de las formas del terreno. En el caso de esta investigación cuyo propósito posterior fue cartografiar geosistemas, funcionó asignar valores de radios menores proporcionales a las áreas de las geoformas correspondientes al indicador geomorfológico de nivel taxonómico inferior (Tabla 3). El radio menor influye en las dimensiones de las categorías *TPI-BLC SAGA* que dan lugar a las formas del relieve más específicas. El radio mayor debe entenderse como el responsable de incluir la diversidad de relieve a clasificar. Es decir, en la medida que el cálculo incluya amplitudes altimétricas propias de muchas geoformas distintas a la de la celda central, el valor de la categoría calculada en cada píxel reflejará mejor las diferencias y contrastes de ese punto respecto a la generalidad topográfica del área de estudio. Por tanto, las formas del terreno serán más representativas de la heterogeneidad geomorfológica existente lejos de la celda señalada.

Lo analizado indica que la heterogeneidad del relieve de un territorio también influye en la decisión de la amplitud del radio dado que, para territorios homogéneos, no es necesario incluir grandes distancias puesto que el relieve permanece relativamente constante. Esto debe tenerse en cuenta pues define el tamaño del conjunto de celdas que es procesado por cada radio, lo que influye en la duración de los procesamientos, en lo que se ven implicadas las características del equipo de cómputo. En consecuencia, la decisión de valores de radio también está ligada a la escala cartográfica. Un territorio relativamente pequeño, a escala detallada, permitirá radios representativos de proporciones grandes del área total, y en cambio, radios de igual valor para territorios extensos y escalas pequeñas, representaría un porcentaje pequeño de la superficie total.

Las formas del terreno generadas en el procesamiento D relativas a los elementos hidrológicos (0, 1 y 2), no representaban correctamente los cauces y cañadas, sin embargo, con el procesamiento A, estas formas del relieve hidrológicas resultaron claramente identificadas al igual que los cráteres volcánicos y los valles basales. Esto sugiere que podrían combinarse las modelaciones con varios radios en dependencia de la precisión requerida en

las formas del relieve de diferentes magnitudes que se deseen delimitar. A tal efecto, podría establecerse una equivalencia entre niveles de paisajes y formas del terreno generadas a partir de diferentes radios proporcionales a la jerarquía de la taxonomía tipológica. Para afirmarlo deben acometerse otros casos de estudio.

**Figura 9.** Esquema cartográfico de los geosistemas de la cuenca Zirahuén, cartografiadas a partir de la herramienta TPI-BLC SAGA. Elaborada por los autores



Este procedimiento va encaminado a reducir la incertidumbre en la delimitación de las geformas como base espacial para la representación de los geosistemas, así como reducir el tiempo en el proceso cartográfico. Al compararlos con otros métodos, el TPI-BLC SAGA tiene la ventaja de condensar aspectos geomorfométricos con geomorfológicos, y arroja límites concretos de formas generales del relieve en cuyos contornos generales el investigador no decide. En el caso del método manual de fotointerpretación, tanto de imágenes aéreas o mapas topográficos, así como a partir de imágenes de satélite y modelos digitales de elevación sombreados con el uso de computadoras (digitalización), influyen las habilidades operativas de quien delimita las geformas, y la capacidad de distinguir y entender las variables visuales como tonos y formas, por lo que las condiciones de visión del usuario y la visibilidad (características de la pantalla, luminosidad ambiental, etc.) son factores que repercuten en el resultado final. En estos casos se demanda mayor conocimiento geomorfológico y del área de estudio.

En el caso de los métodos más recientes con el uso de los SIG, los especialistas intervienen con sus criterios no solo en los valores de los parámetros iniciales de los índices usados, sino en la reorganización de los resultados. Por ejemplo Ramón y Salinas (2012), a partir de una matriz cruzan los valores de inclinación de la pendiente con los de altura, y luego se definen rangos sobre la base de criterios de expertos; o Priego et al. (2010) y Hernández et al (2017), que aplican índices geomorfológicos como la densidad de curvas de nivel, cuyos resultados son segmentados en clases y constituyen las superficies y contornos de los polígonos de las geformas. Estos se diferencian geomorfométricamente según sus valores correspondientes de disección vertical, también agrupados por rangos, con las que finalmente son clasificadas las formas del relieve.

Los resultados de una técnica geomorfométrica basada en el Índice de posición topográfica con propósitos de identificación y cartografía de geosistemas, están menos sesgados que aquellos obtenidos por el cálculo de la densidad de las curvas de nivel, por tanto los polígonos de las formas del relieve son obtenidos de una manera más consistente y con potencial para ser repetida como técnica en otros tipos de paisajes. Es decir, con el conocimiento de la Geografía de los Paisajes, puede convertirse en una herramienta de investigación replicable. También, es novedoso el uso del *TPI-BLC SAGA* en el ámbito de la Geografía de los Paisajes y trae la ventaja de sintetizar en un mismo análisis automático diferentes variables geomorfométricas como las pendientes y la posición relativa, que proviene de la comparación de la altura de un lugar respecto a una distancia corta y otra extendida (no solo con un radio como el TPI por sí solo). Además de arrojar resultados con polígonos ya clasificados en formas del terreno con contornos definidos.

## 5. Conclusiones

Con este caso de estudio, el uso de la herramienta *TPI-BLC SAGA* demostró ser una técnica muy efectiva para la delimitación de las geoformas como tarea inicial de la cartografía de los geosistemas. Los contornos de las formas del terreno resultó ser la geoinformación más útil, aportando la base espacial para los límites de las unidades. Ello supeditado al conocimiento geomorfológico del área de estudio y la experticia del usuario.

En el caso de la aplicación a la cartografía de los geosistemas, se debe recalcar la importancia de las geoformas y sus dimensiones como índice diagnósticos en la clasificación tipológica de los paisajes. En este estudio, fue la mesoforma a la que se ajustaron las formas del terreno generadas por *SAGA*, y constituyó la referencia para identificar y cartografiar las demás geoformas y unidades de paisajes de niveles taxonómicos a escala grande. Así, esta técnica enmarcada en la cartografía de paisajes físico-geográficos puede ser aplicada para el mismo objetivo en otras áreas, siempre y cuando se tenga claro la relación entre el nivel taxonómico de paisajes y el indicador geomorfológico correspondiente (dimensiones de las geoformas que dan lugar a las facies, subcomarcas, comarcas o localidades). Es preciso aclarar que la relación de las formas del relieve con las categorías de formas del terreno (o sus asociaciones espaciales), son propias del área de estudio y no se afirma que se cumple para otras áreas. Para corroborarlo habría que repetir la técnica en otras zonas volcánicas.

Es importante destacar que los procedimientos efectuados corresponden a un estudio local, no regional, ya que la escala es un factor determinante a tener en cuenta para las decisiones respecto a los valores de los parámetros a asignar y en la interpretación de los resultados. Sobre esta línea, la selección de los radios de vecindad es un paso importante para la validez de la geoinformación resultante. El radio menor es proporcional a las dimensiones de las formas del relieve más específicas y el mayor con el área de extensión suficiente que abarque la diversidad geomorfológica representativa de toda el área de estudio. Para ello debe tenerse en cuenta la extensión del área a procesar (en estrecha relación con la escala de representación), la heterogeneidad topográfica del territorio, la magnitud espacial de las formas que se espera identificar y los objetivos de la investigación para los que se generaron las formas del terreno. Todos estos elementos están atravesados por la experiencia del investigador y su conocimiento del área de estudio.

**Contribuições dos Autores:** Concepción: García Espino; Metodología, García Espino y Bollo Manent; software: García Espino y Martín Morales; validación: García Espino, Martín Morales y Bollo Manent; análisis formal: García Espino y Martín Morales; investigación: García Espino, Martín Morales y Bollo Manent; recursos: García Espino y Bollo Manent; preparación de datos: García Espino; escritura del artículo: García Espino; revisión: García Espino, Martín Morales y Bollo Manent; supervisión: Bollo Manent; adquisición de financiamiento: García Espino y Bollo Manent; diseño y elaboración cartográfica: García Espino.

**Financiamiento:** Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) a través de una beca para estudios de doctorado.

**Agradecimientos:** Se agradece al Posgrado de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en particular al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA).

**Conflicto de Interese:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados

## Referencias

1. ARMIENTA, M. A.; VILACLARA, G.; CRUZ-REYNA, S.; RAMOS, S., CENICEROS, N.; CRUZ, O.; AGUAYO, A.; ARCEAGA-CABRERA, F. Water chemistry of lakes related to active inactive Mexican volcanoes. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, n. 178, p. 249-258, 2008. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.019>
2. BASTIAN, O; GLAWION, R.; HAASE, D.; HAASE, G.; KLINK, H.-J.; STEINHARDT, U.; VOLK, M. Landscape analysis, synthesis, and diagnosis. In: BASTIAN, O.; STEINHARDT, U. **Development and perspectives of landscape ecology**. Dordrecht: Springer, 2002. p. 113-168. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1237-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1237-8_3)
3. BERTRAND, G., & TRICART, J. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v. 39, n. 3, p. 249-272, 1968. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1968.4553>
4. BOCCO, V. G.; MENDOZA, M. E.; PRIEGO, S. Á.; BURGOS, A. **La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial**. 1ra Ed. Ciudad México: SEMARNAT, 2010. 72p.
5. BOLLO, M. M. La Geografía del Paisaje y la Geoecología: Teoría y enfoques. In: CHECA, A. M. M.; SUNYER, M. P. (Coords.). **Paisaje: métodos de análisis y reflexiones**. 1ra Ed. Ciudad México: Ediciones del Lirio-UAM, 2018. p. 125-152.
6. BRABYN, L. GIS analysis of macro landform. In: 10th Colloquium of the Spatial Information Research Centre's, 12, 1998, **Proceedings of the Spatial Information Research Centre's 10th Colloquium**, University of Otago, Nueva Zelanda: 1998. p. 35-48.
7. DEUMLICH, D.; SCHMIDT, R.; SOMMER, M. A. Multiscale soil-landform relationship in the glacial-drift area based on digital terrain analysis and soil attributes. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 173, n. 6, p. 843-851, 2010. <http://doi.org/10.1002/jpln.200900094>
8. DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. **Landform classification of New Mexico by computer**. U. S. Department of the Interior: U. S. Geological Survey: 1991. 15p. Open File Report. <http://doi.org/10.3133/ofr91634>
9. DGETN. **Cartas geológicas E14a31, E14a32**. Ciudad México: INEGI, 1978. 1:50 000.
10. DGG. **Cartas edafológicas E14a31, E14a32**. Ciudad México: INEGI, 1983. 1:50 000
11. GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary Topographic Attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and Applications**. 1ra Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000. p. 51-85
12. GARCÍA, A. E. **Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen**. 5ta Ed. Ciudad de México: Instituto de Geografía-UNAM, 2004. 90p.
13. GILBERT, J. T.; MACFARLANE, W. W.; WHEATON, J. M. The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. **Computers & Geosciences**, n. 97, p. 1-14, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.014>
14. GENCHI, S. A.; CARBONE, M. E.; PICCOLO, M. C.; PERILLO, G. M. E. Clasificación geomorfológica automatizada en terrazas del Noreste del Macizo Norpatagónico, Argentina. **GeoFocus**, n. 11, p. 182-206, 2011.
15. González, T. J. J. Carl Troll y la Geografía del Paisaje: vida, obra y traducción de un texto fundamental. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, n. 59, p. 173-200, 2012.
16. GUISSAN, A.; WEISS, S. B.; WEISS, A. D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. **Plant Ecology**, n. 143, p. 107-122, 1999. <http://doi.org/10.1023/a:1009841519580>
17. HERNÁNDEZ, S. J. R.; PÉREZ, D. J. L.; ROSETE, V. F.; VILLALOBOS, D. M.; MÉNDEZ, L. A. P.; NAVARRO, S. E. Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfológica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve. **Investigaciones Geográficas**, n. 94, p. 1-15, 2017. <https://doi.org/10.14350/rig.57019>
18. HAMMOND, E. H. Small-scale continental landform maps. **Annals of the Association of American Geographers**, n. 44, p. 33-42, 1954. <http://doi.org/10.1080/00045605409352120>
19. HASDENTEUFEL, P.; MATEO, R. J. M.; BAUME, O.; TORRES, G. C. R. J. La Geoecología como herramienta para la gestión ambiental. Estudio de caso de la cuenca hidrográfica superficial del río Quibú, Provincia Ciudad de La Habana, Cuba. **Revista Universitaria de Geografía**, n. 17, p. 309-329, 2008.
20. HERNÁNDEZ, S. J. R.; ORTIZ, P. M. A.; FIGUEROA, M. E. M. Análisis morfoestructural del estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. **Investigaciones Geográficas**, n. 68, p. 7-24, 2009.
21. INEGI. **Carta de efectos climáticos regionales E14-1**. Ciudad México: INEGI, 1988. 1:250 000
22. INEGI. **Conjunto de datos topográficos E14a31, E14a32**. Ciudad México: INEGI, 2000. 1:50 000.

23. INEGI. **Red hidrográfica y dirección de flujo por subcuencas**. Ciudad México: INEGI, 2010, a. 1:50 000.
24. INEGI. **Subcuenca hidrográfica Zirahuén**. Ciudad México: INEGI, 2010, b. 1:50 000
25. ISACHENKO, A. G. **Principles of Landscape Science and Physical-Geographic Regionalization**. 1ra Ed. Melbourne: Melbourne University Press, 1973. 311p.
26. JOSÉ, R. M.; MENDOZA, R. R.; SILVA, C. R.; SIMUTA, C. R.; REYES, L. D.; PASCUAL, R. F. Elementos para gestión del agua en la cuenca del lago de Zirahuén. **Terra Latinoamericana**, n. 36, p. 431-439, 2018. <http://doi.org/10.28940/terra.v36i4.418>
27. LEONTIEV, O. K.; RICHAGOV, G. T. **Geomorfología general** (en ruso). Moscú, URSS: Visshaya Shkola, 1979. 287p.
28. LÓPEZ, B. R. **Geoecología del paisaje e impacto ambiental en la Sierra Nevada**. Tesis (Maestría en Ciencias Biológicas). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad México. 1994. 107p.
29. MAS, J. F.; LEMOINE, R. R.; GONZÁLEZ, R.; LÓPEZ, J. S.; PIÑA, A. G.; HERRERA, E. F. Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. **Madera y Bosques**, v. 23, n. 2, p. 119-131, 2017. <http://doi.org/10.21829/myb.2017.2321472>
30. MATEO, R. J. M. **Geografía de los paisajes. Paisajes naturales**. 1ra Ed. La Habana: Editorial Universitaria, 2011. 198p.
31. MATEO, R. J. M.; SILVA, E. V.; VICENS, R. O. O legado de Sochava. **GEOgraphia**, v. 17, n. 33, p. 225-233, 2015.
32. MENDOZA, R.; SILVA, R.; JIMÉNEZ, A.; RODRÍGUEZ, K.; SOL, A. Lake Zirahuén, Michoacán, México: an approach to sustainable water resource management based on the chemical and bacterial assessment of its water body. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, n. 2, p. 1-11, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.scp.2015.10.001>
33. OLAYA, V.; CONRAD, O. Geomorphometry in SAGA. In: HENGL, T.; REUTER, H. (Eds.). **Geomorphometry: Concepts, software, applicattions**. 1ra Ed. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 293-308.
34. ORTIZ, P. C. F. Agricultura de Exportación de Aguacate y Turismo en Michoacán. Una perspectiva desde los Servicios Ecosistémicos. **El periplo sustentable**, n. 33, p. 452-485, 2017.
35. PETSCH, C.; SOUZA, R. L. E.; TRENTIN, R.; ROSA, K. K.; FIGUEIREDO, A. R.; SIMÕES, J. C. O uso de métodos de mapeamento automático de relevo para análise de formas glaciais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 253-269, 2020. <http://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1771>
36. PIKE, R. J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models. **Mathematical Geology**, n. 20, p. 491-511, 1988.
37. PRIEGO, S. A. G.; BOCCO, V. G.; MENDOZA, M.; GARRIDO, A. **Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje**. 1ra Ed. Ciudad México: Dirección de Publicaciones del INE, 2010. 108p.
38. RAMÓN, P. A. M.; SALINAS, C. E. Guía para la elaboración de mapas de paisajes con el uso de ArcGIS. Metodología para la determinación de unidades de paisajes a nivel local con ArcGIS Desktop. Saarbrücken: Editorial Academia Española, 2012. 67p.
39. REU, J.; BOURGEOIS, J.; BATS, M.; ZWERTVAEGHER, A.; GELORINI, V.; SMEDT, P.; CHU, W.; ANTROP, M.; MAEYER, P.; FINKE, P.; MEIRVENNE, M.; VERNIERS, J.; CROMBÉ, P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. **Geomorphology**, v. 186, p. 39-49, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
40. SALINAS, C. E.; MATEO, R. J. M.; SOUZA, C. L. C.; MOREIRA, B. A. Cartografía de los paisajes: Teoría y aplicación. **Physis Terrae**, v. 1, n. 1, p. 7-29, 2019. <http://doi.org/10.21814/physisterrae.402>
41. SKIDMORE, A. K. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 4, n. 1, p. 33-49, 1990. <http://doi.org/10.1080/02693799008941527>
42. SOLNTSEV, N. A. Basic Problems in Soviet Landscape Science. **Actas de la Sociedad Geográfica de la Unión** (en eslovaco), n.1, p. 3-15, 1962. <http://doi.org/10.1080/00385417.1962.10769946>
43. TAGIL, S.; JENNESS, J. GIS-based automated Landform Classification and Topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 6, p. 910-921, 2008. <http://doi.org/10.3923/jas.2008.910.921>
44. Torres, R. E.; Lozano, G. S.; Figueroa, R. B. L.; Ortega, G. B.; Vázquez, C. G. Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v. 29, n. 3, p. 764-778, 2002.

45. VILLASEÑOR, G. L. E. (Ed.). **La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado**. 1ra Ed. Ciudad México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2005. 266p.
46. WEISS, A. D. **Topographic Position and Landforms Analysis**. In: ESRI International User Conference, 21, 2001, San Diego, EUA. Póster, 2001.



obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.