

BÚSQUEDA DE GEOFORMAS SUPERFICIALES CIRCULARES CON TOPOGRAFÍA NEGATIVA ASOCIADAS A PROCESOS GEOLÓGICOS EN UN MARCO DE GEOGRAFÍA FÍSICA DENTRO DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA, ECUADOR.

SEARCH OF CIRCULAR SURFACE LANDFORMS WITH NEGATIVE TOPOGRAPHY ASSOCIATED WITH GEOLOGICAL PROCESSES IN A PHYSICAL GEOGRAPHY FRAMEWORK WITHIN THE PROVINCE OF PICHINCHA, ECUADOR.

Myrian Herrera Centeno¹, Milton Ramírez Navas², Francisco Guerrero Narváez³.

RESUMEN

Las geoformas superficiales circulares con topografía negativa son el resultado de la interacción de factores de origen natural asociados a procesos geológicos activos e inactivos; por lo tanto, si dichos procesos vuelven a ocurrir generarían eventos que pueden constituirse en una amenaza para la población, los medios de producción y el medio ambiente, siendo necesario identificar, definir y localizar espacialmente estas estructuras en el territorio. Este estudio es una primera aproximación para lograr este propósito mediante composiciones de firmas geométricas utilizando las variables de pendiente, textura, convexidad, concavidad, profundidad del valle, índice de convergencia y sombreado analítico en el software SAGA 7.8.2. El procedimiento ejecutado inició con el reconocimiento de las geoformas circulares con topografía positiva como edificios volcánicos y sus principales características (drenajes, taludes, cráteres, vento, escarpes, marcas de erosión, entre otros), dichas estructuras ya identificadas permitieron retraer información útil para definir geoformas circulares con topografía negativa delimitando una gran zona de erosión en la zona noreste de estudio. Sin embargo, se constata la necesidad de determinar un procedimiento automático que permita identificar las estructuras objetivo de manera automatizada, mediante el uso de sistemas de información geográfica.

Palabras clave: firma geométrica; geoforma circular; modelo digital de superficie; procesos geológicos; sistema de información geográfica.

ABSTRACT

The circular surface landforms with negative topography are the result of the interaction of factors of natural origin associated with active and inactive geological processes; therefore, if these processes occur again, they would generate events that may constitute a threat to the population, the means of production and the environment, making it necessary to identify, define and spatially locate these structures in the territory. This study is a first approximation of achieving this purpose through compositions of geometric signatures using the variables of slope, texture, convexity, concavity, valley depth, convergence index and analytical hillshading in the SAGA 7.8.2 software. The procedure carried out began with the recognition of circular landforms with positive topography as volcanic structures and their main characteristics (drains, slopes, craters, escarpments, erosion marks, among others), these already identified structures allowed us to collect useful information to define circular landforms with negative topography delimiting a large erosion zone in the northeastern study area. However, the need to determine an automatic procedure that allows the identification of target structures in an automated way, through the use of geographic information systems is confirmed.

Keywords: geometric signature; circular landform; digital surface model; geological processes; geometric information system.

¹ Dirección de Desarrollo de Agrotecnologías Producción Musáceas, Instituto Nacional de Investigaciones. Quito, Ecuador.

² Dirección de Investigación Cartográfica, Geográfica y Espacial, Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.

³ Dirección de Investigación Cartográfica, Geográfica y Espacial, Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

Ecuador se localiza al noroeste de América del Sur y está atravesado por el paralelo cero. Al norte limita con Colombia, al sur y este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico, además cuenta con una región insular llamada Islas Galápagos. Topográficamente se ubica en el denominado cinturón de fuego del Pacífico, siendo ésta una zona de subducción que genera una importante actividad geológica. El clima de Ecuador, a más de su ubicación geográfica, se encuentra influenciado por la cordillera de los Andes que ha generado variaciones altitudinales del territorio sobre el nivel del mar, el relieve, la cobertura vegetal, las condiciones atmosféricas, entre otros factores (GADPP, 2015).

La provincia de Pichincha está situada en el centro norte del país, en la zona geográfica de la región interandina, ocupa la hoya Guayllabamba en el este y ramificaciones subandinas en el noroccidente; su cabecera provincial es la ciudad de Quito, la cual es la urbe más poblada y capital del país (Figura 1). Presenta zonas climáticas nivales y de páramo en las cordilleras Occidental y Oriental; clima mesotérmico húmedo y muy húmedo en el oeste de la Cordillera Occidental, clima ecuatorial mesotérmico seco y semihúmedo en el valle del Distrito Metropolitano de Quito, cantón Mejía y cantón Pedro Moncayo, mientras que un clima tropical caracteriza a las localidades del noroccidente, principalmente al cantón Puerto Quito. El régimen de precipitaciones varía entre 800 hasta 2.000 mm, la temperatura fluctúa entre -3 a 10 °C en la cordillera y entre 15 a 25 °C en las zonas más bajas (GADPP, 2015).

El presente estudio pretende incrementar el conocimiento de la geografía física ecuatoriana, identificando a la provincia de Pichincha como un punto de partida para la búsqueda de geoformas superficiales circulares que puedan estar asociadas a procesos geológicos. La metodología desarrollada se podrá utilizar en el resto del país, aportando al desarrollo de las competencias institucionales del Instituto Geográfico Militar de Ecuador.

Las geoformas superficiales son fisonomías existentes de la superficie terrestre (De Pedraza Gilsanz et. al., 1996) y de otros planetas, que han

sido creadas por procesos naturales (López, 2006), internos y/o externos al planeta, por lo tanto, son rasgos específicos que se pueden reconocer y describir (Bolongaro - Crevenna et. al., 2004). Estas geoformas interiorizan información sobre su estructura y composición, exteriorizando características particulares de suelo, topografía, geología, condiciones hídricas (López, 2006) y están sometidas en todo momento a las acciones de la dinámica planetaria (De Pedraza Gilsanz et. al., 1996) y ultraterrestre, sin importar su origen primario.

En este contexto, una geoforma circular se define como aquella estructura superficial caracterizada por presentar una geometría semejante a una circunferencia con topografía negativa y que puede ser distinguida o descrita a escala local.

La corteza terrestre no es estática, existen procesos geológicos que la modifican constantemente. Una línea de pensamiento considera a la Tierra como un sistema cerrado, expresando que ésta se altera por acción de fuerzas externas que actúan hacia abajo desde la biosfera y otras fuerzas internas que actúan hacia arriba y desde el interior del planeta (Duque Escobar, 2020). Enmarcado en este planteamiento, las geoformas superficiales circulares pueden ser generadas por:

- Fallas geológicas que pueden originar estructuras como: fosa tectónica (graben), cuenca de apertura (pull apart basin), estructura en flor negativa (negative flower structure), cuya característica es un hundimiento de la superficie terrestre, denominado también subsidencia (Griem, 2020).
- En zonas kársticas se pueden generar dolinas, depresiones cerradas de tamaño métrico a hectométrico con forma circular, semicircular a elíptica, con una zona central donde se ubica el sumidero que tiene tasas de subsidencia muy altas (Ulloa et. al., 2011; Benito et. al., 2016).
- El vulcanismo puede generar edificios volcánicos y cráteres con formas circulares, los eventos explosivos son capaces de crear calderas caracterizadas por ser depresiones elíptico-circulares. En caso que el magma no logre llegar a la superficie, se puede consolidar en el subsuelo adquiriendo diversas formas,

entre éstas la geometría de un domo. En ambientes donde la corteza terrestre está sometida a compresiones, se pueden generar diapiros, rocas blandas que por acción de los

esfuerzos adquieren la forma de domo (domos de sal) (Duque Escobar, 2020; Carricondo, 2010).

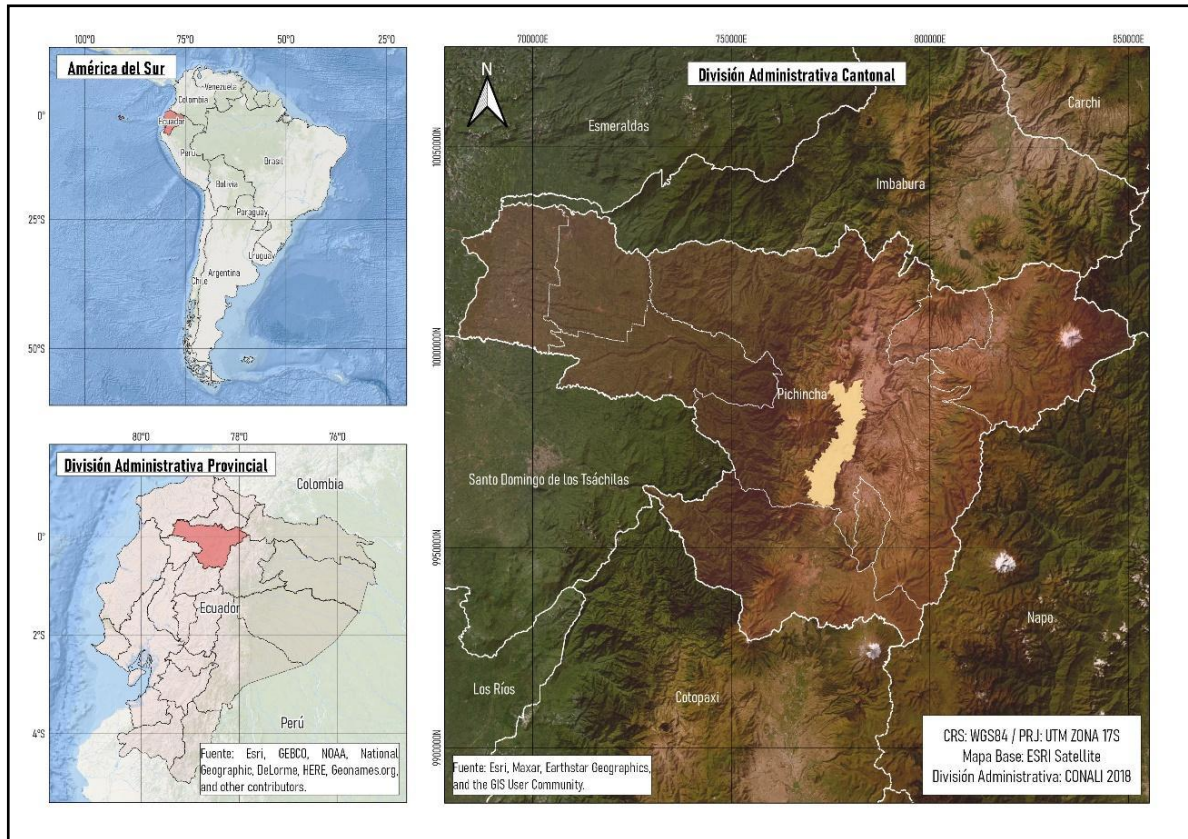


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia (QGIS 3.20.3-Odense).

Por otra parte, existen eventos enmarcados en una dinámica externa a la Tierra que son capaces de modelar la superficie terrestre, a estas fisonomías producto de colisiones o impactos de objetos movilizadas por el espacio sideral (asteroides, meteoroides, cometas, entre otros) se les denomina cráteres de impacto, siendo las estructuras geológicas más comunes suscitadas en los cuerpos rocosos del Sistema Solar (Bartali et. al., 2018).

METODOLOGÍA

En base a las búsquedas realizadas, no han sido desarrollados modelos específicos para la búsqueda y reconocimiento de geoformas superficiales circulares con topografía negativa; sin embargo, existen modelos para clasificación automática de las fisonomías superficiales

considerando a la pendiente como una variable constante de análisis en la literatura revisada. Acorde a lo estipulado en investigaciones recientes de Acevedo (2011), Castañeda (2016), Cajamarca (2014), Correa (2012) y Genchi (2011), el insumo principal para la identificación de geoformas superficiales es el modelo digital de superficie (MDS). Los datos digitales de elevación de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) son un esfuerzo de investigación internacional que obtuvo modelos digitales de elevación a una escala casi global. El SRTM V3 es recomendado por su estabilidad y precisión indistintamente del tipo de zona, siendo desarrollado por la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA); cuenta con una resolución de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m) y fue sometido a un proceso de llenado de vacíos utilizando datos de código abierto (ASTER GDEM2, GMTED2010 y

NED), a diferencia de otras versiones que contienen vacíos o han llenado sus vacíos con fuentes comerciales (Farr et al., 2007).

La metodología propuesta por Iwahashi and Pike (2007) consiste en la aplicación de un procedimiento para la automatización de formas del terreno a partir de un modelo digital de superficie, combinado con variables calculadas para resaltar características del suelo. Se establece que una herramienta de clasificación numérica de la superficie terrestre es la firma geométrica, definida como un “conjunto de medidas que describe la forma topográfica lo suficientemente bien como para distinguir paisajes geomorfológicamente dispares” (Pike, 1988); si las formas de superficie han sido capturadas por mapas de contorno o modelos digitales de elevación, sus cualidades geométricas pueden ser extraídas y expresadas por un grupo de atributos de forma de superficie más o menos independientes.

Iwahashi y Pike proponen que utilizando tres variables es suficiente para la construcción de una firma geométrica, cuya finalidad es crear mapas de unidades de terreno que permitan identificar las formas del terreno. Las variables utilizadas fueron: pendiente (grado), convexidad de la superficie y textura (frecuencia de características o espaciado) (Figura 2). A continuación, se presenta una breve definición de cada una de ellas:

- Pendiente: Tasa máxima de cambio de valor de la elevación de una celda respecto de sus vecinas (grados).
- Textura: Enfatiza la expresión fina versus gruesa de espaciado topográfico o “grano”, se calcula extrayendo celdas de la cuadrícula que delimitan la distribución de valles y crestas (porcentajes de celdas de cuadrícula de un radio de 10 celdas que son hoyos y picos).
- Convexidad: Curvatura positiva de la superficie o la convexidad local, dando valores positivos en áreas convexas hacia arriba, valores negativos en áreas cóncavas y cero en pendientes planas (porcentajes de celdas de cuadrícula de un radio de 10 celdas que tienen curvatura positiva).

La herramienta Clasificación de la Superficie del Terreno del software SAGA GIS versión 7.8.2

(System for Automated Geoscientific Analyses) implementa este procedimiento con un algoritmo que realiza la identificación de tipos topográficos mediante un ejercicio de clasificación de escenas, utilizando reglas dentro de un árbol de decisión simple para aplicar operaciones de procesamiento de imágenes a mapas digitales de las tres variables. La secuencia no está supervisada porque las clases resultantes no se determinan a priori mediante muestras de entrenamiento de tipos fisiográficos de destino, aunque el número de categorías de salida se limita a opciones de 8, 12 o 16 clases que deben estar preestablecidas. De manera previa, las tres variables fueron normalizadas y asignadas pesos con la finalidad de tener un mismo rango de valores; obteniendo así dos modelos de clasificación del terreno (Formas de Relieve y Formas de Relieve_conc).

Considerando que esta metodología busca identificar formas generales del terreno, y, en ningún caso de manera específica las geoformas superficiales circulares de topografía negativa, su aplicación explícita resulta insuficiente; sin embargo, al considerar las capacidades de la utilización de la variable concavidad en reemplazo de la convexidad, se aporta una primera clasificación del terreno resaltando las superficies deprimidas (Figura 3). Posteriormente, a efectos de identificar las geoformas superficiales circulares se realizó un conjunto de pruebas de diferentes composiciones asignando a cada banda del visible otras variables, siendo el sombreado analítico, el índice de convergencia, la profundidad del valle y la concavidad, en composición temática con Iwahashi y Pike modificado, lo cual permitió resaltar las geoformas superficiales circulares de pendiente negativa para su adecuado reconocimiento por análisis visual (Figura 4).

Búsqueda de geformas superficiales circulares con topografía negativa asociadas a procesos geológicos en un marco de geografía física dentro de la provincia de Pichincha, Ecuador
Myrian Herrera Centeno, Milton Ramírez Navas, Francisco Guerrero Narváez.

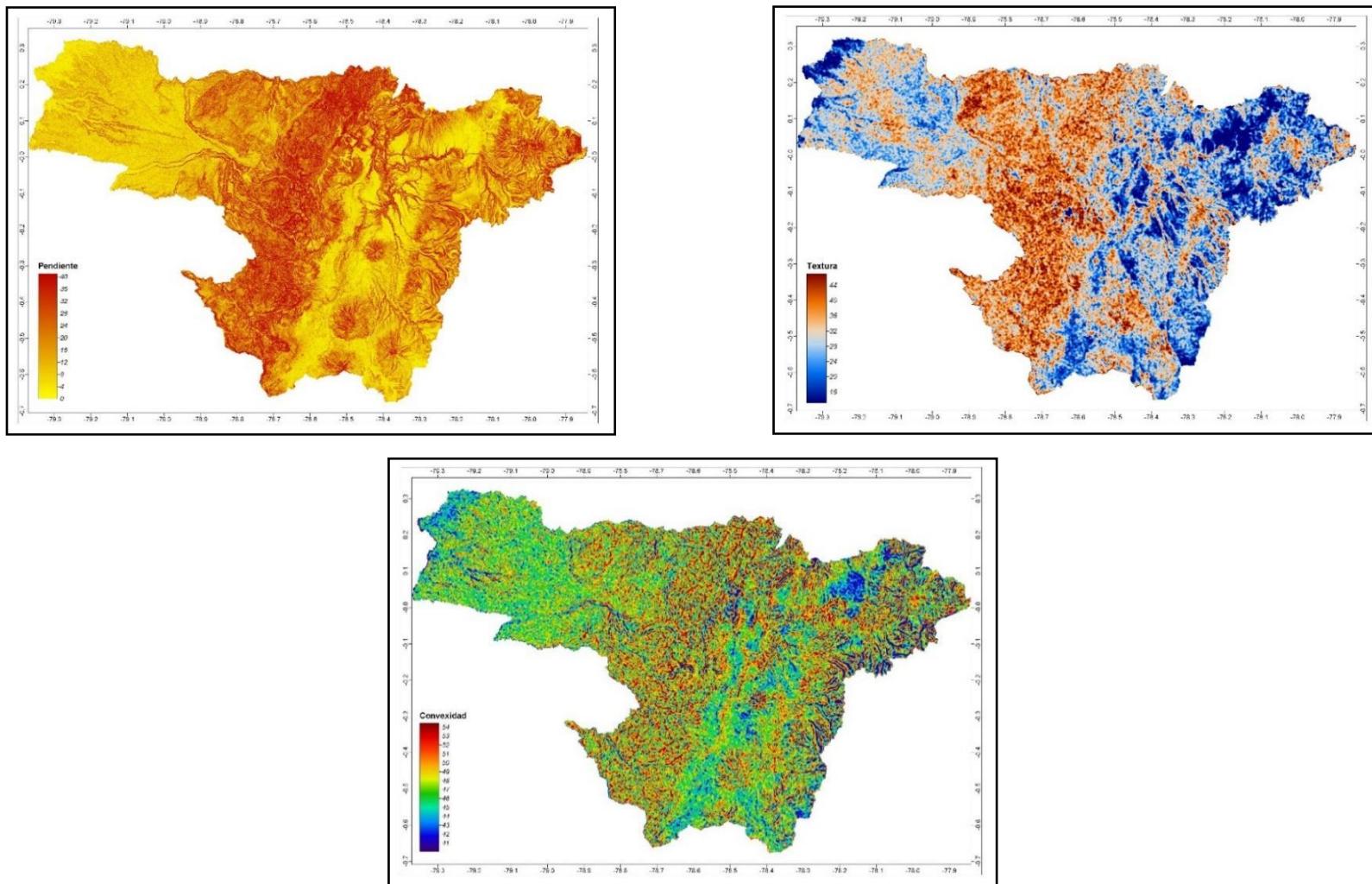


Figura 2. Variables de pendiente, textura y convexidad de la provincia de Pichincha. Elaboración propia (SAGA 7.8.2).

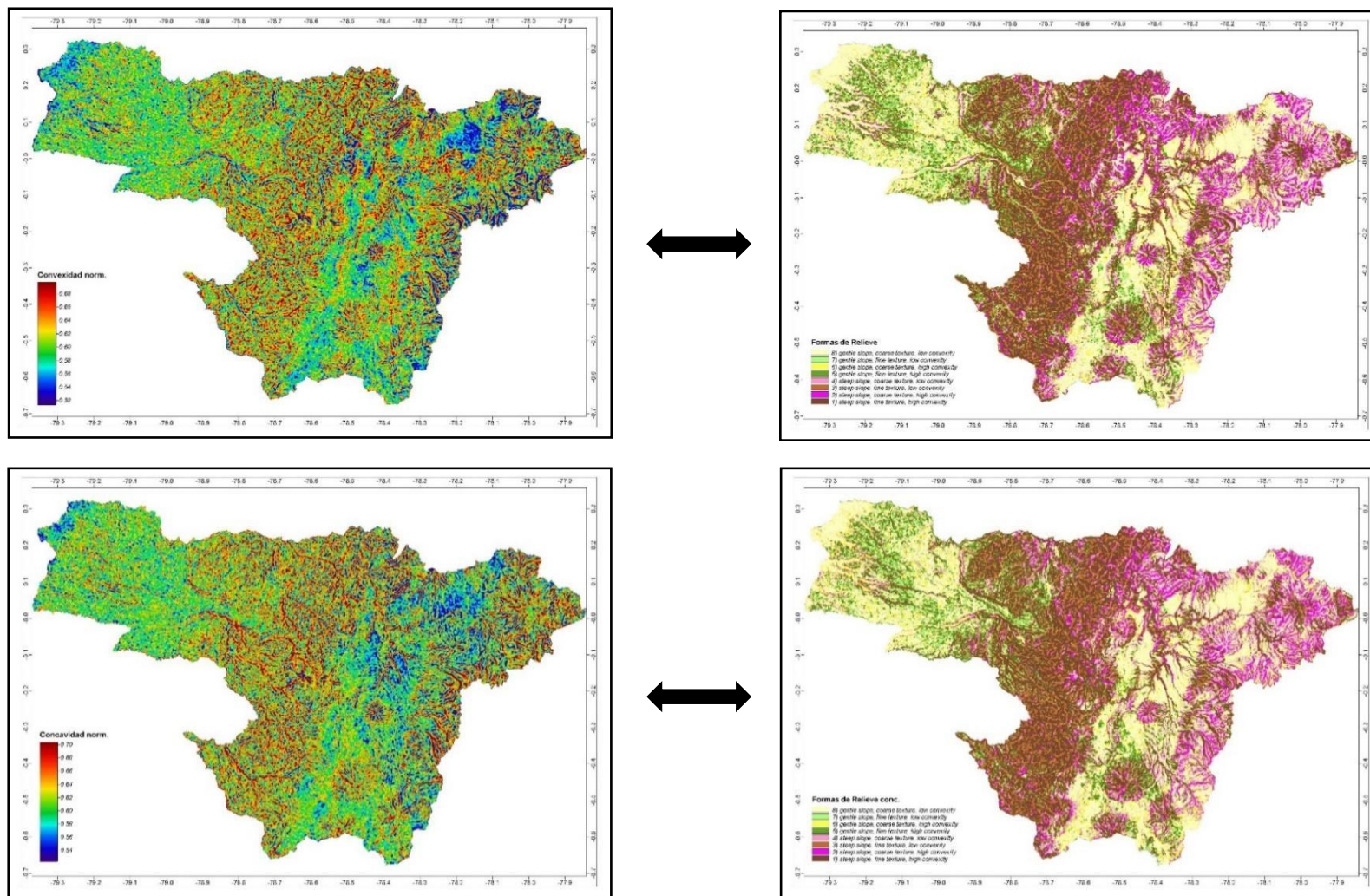


Figura 3. Comparación de resultados del método Iwahashi y Pike utilizando la variable de Convexidad vs. Concavidad. Elaboración propia (SAGA 7.8.2).

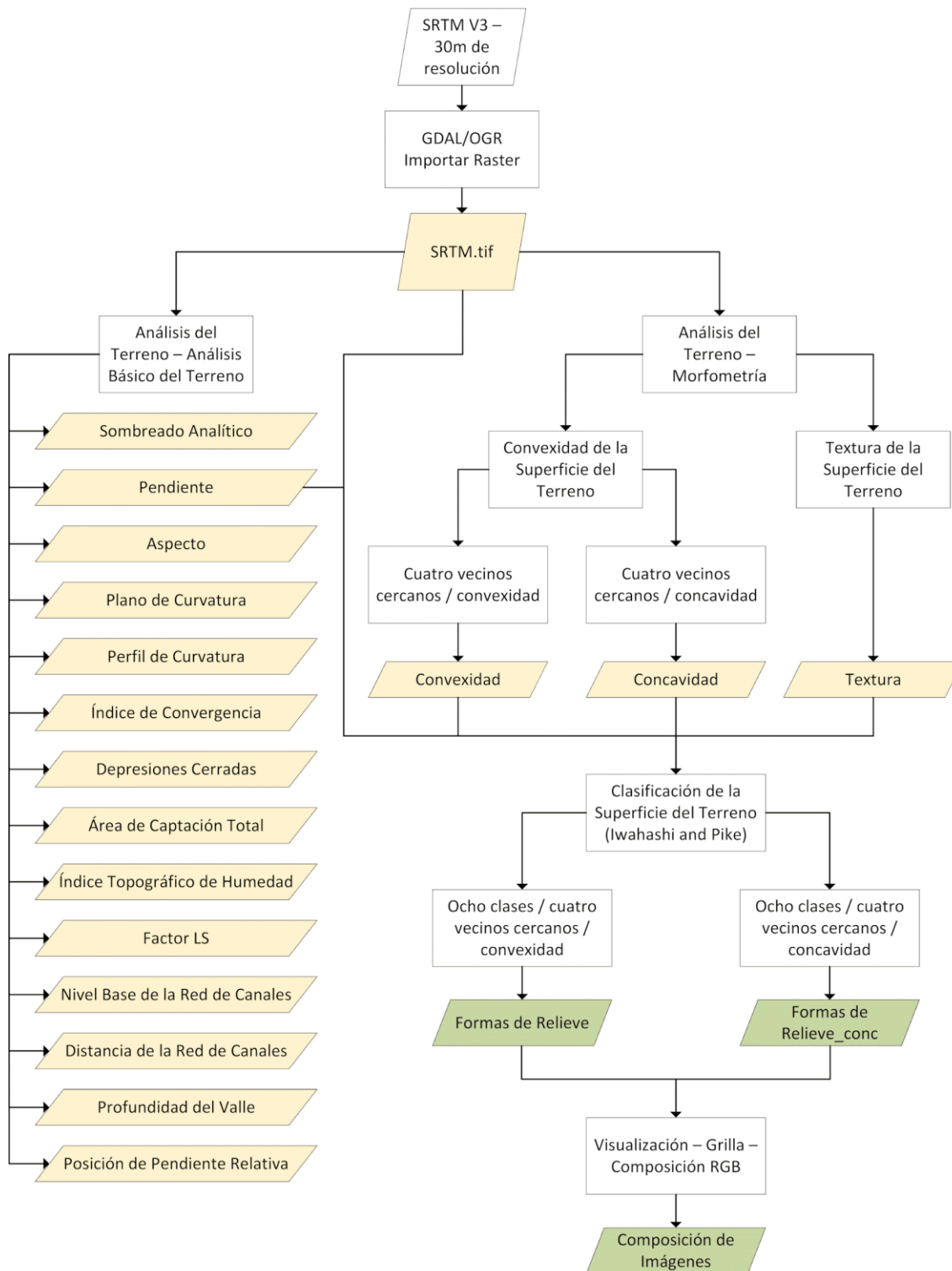


Figura 4. Diagrama metodológico. Elaboración propia (Visio Professional 2016).

RESULTADOS

Los resultados de la composición temática aportan información de interés en relación con cada una de las variables analizadas, a continuación, se describen las principales composiciones RGB:

FORMAS DE RELIEVE CONCAVIDAD + PROFUNDIDAD DEL VALLE + CONCAVIDAD.

La composición identifica los drenajes radiales divergentes y convergentes que configuran los

edificios volcánicos, así como las zonas de erosión asociadas a escarpes o taludes. Claramente, se puede diferenciar las zonas elevadas (cordillera y elevaciones individuales) de las planicies y áreas de baja rugosidad, al oeste y en el valle interandino de la provincia de Pichincha se aprecian los ríos que han configurado valles aluviales amplios; sin embargo, a la escala de trabajo desaparecen aquellos drenajes que no han configurado dichas llanuras de inundación (Figura 5).

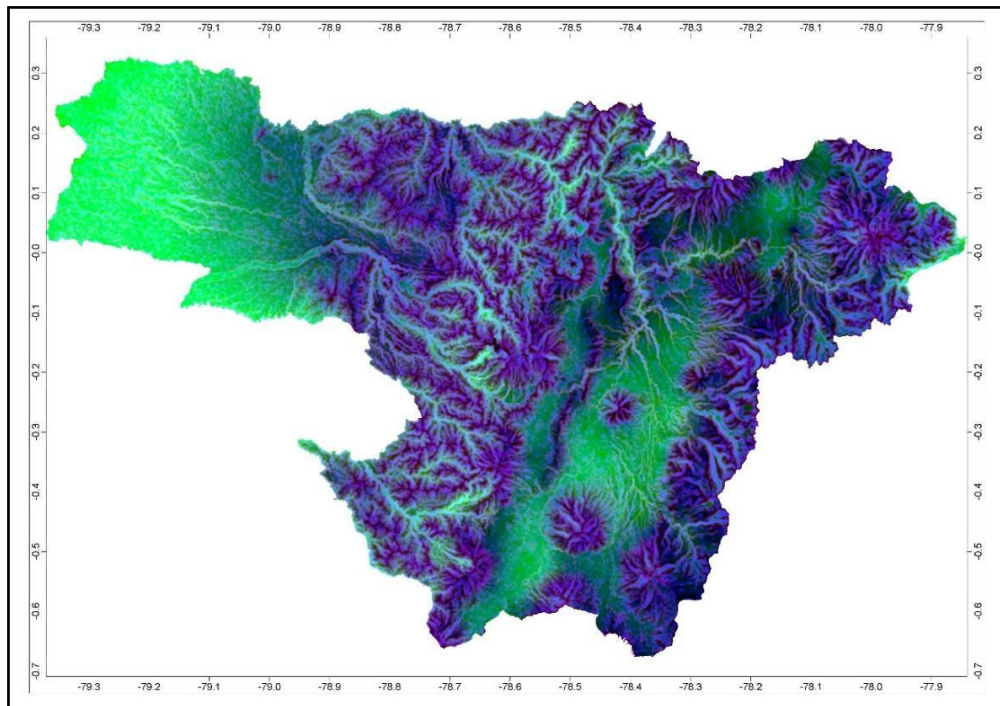


Figura 5. Composición temática land_concav_valley_depth_concav. Elaboración propia (SAGA 7.8.2).

FORMAS DE RELIEVE CONCAVIDAD + ÍNDICE DE CONVERGENCIA + CONCAVIDAD.

La composición resalta los drenajes inclusive aquellos que no han desarrollado un gran valle aluvial, se reconocen los ríos radiales divergentes y convergentes asociados a cráteres y los canales localizados en las bases de los edificios volcánicos del valle interandino que configuran una geometría circular; también sobresalen divisorias de aguas, cumbres y escarpes (Figura 6).

FORMAS DE RELIEVE CONCAVIDAD + SOMBREADO ANALÍTICO + CONCAVIDAD.

La composición invirtió la percepción visual de las estructuras, muestra a las superficies elevadas (cóncavas) como estructuras de topografía negativa (depresiones) enmarcadas en círculos de color rojo, mientras que las fisonomías de topografía negativa (convexas) se perciben como elevaciones enmarcadas en círculos de color amarillo. Se destacan los drenajes y en varios edificios volcánicos sus ventos, además en la zona noroeste de estudio resalta una estructura asociada a un gran proceso erosivo (Figura 7).

Búsqueda de geformas superficiales circulares con topografía negativa asociadas a procesos geológicos en un marco de geografía física dentro de la provincia de Pichincha, Ecuador
Myrian Herrera Centeno, Milton Ramírez Navas, Francisco Guerrero Narváez.

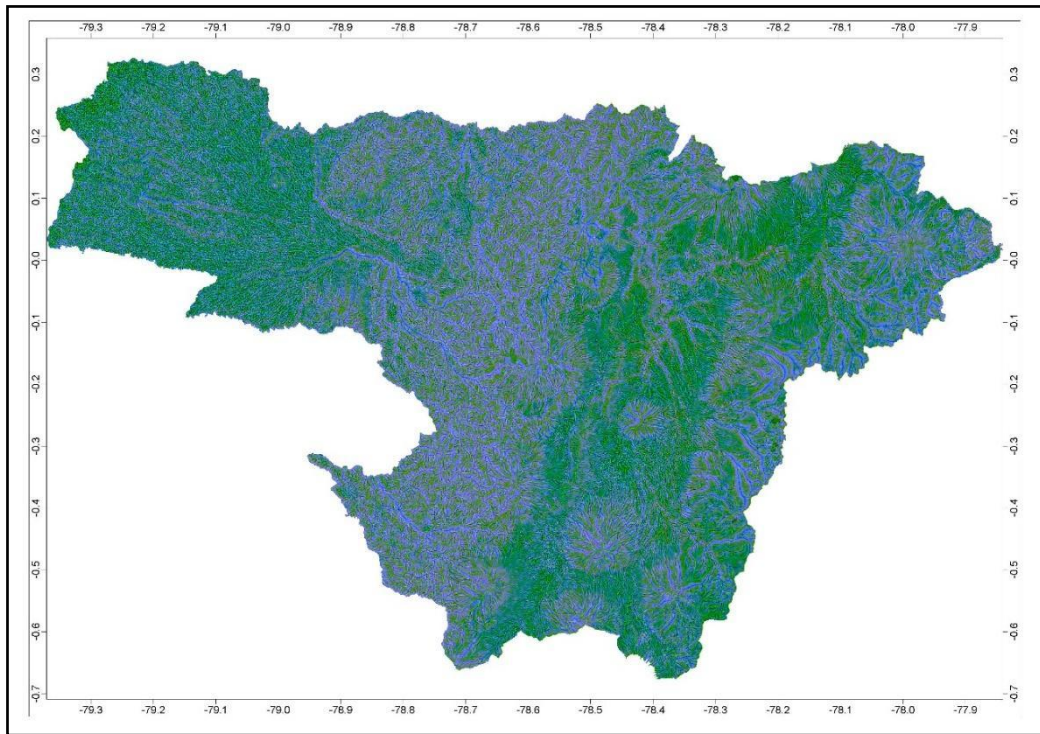


Figura 6. Composición temática land_concav_convergence_idx_concav. Elaboración propia (SAGA 7.8.2).

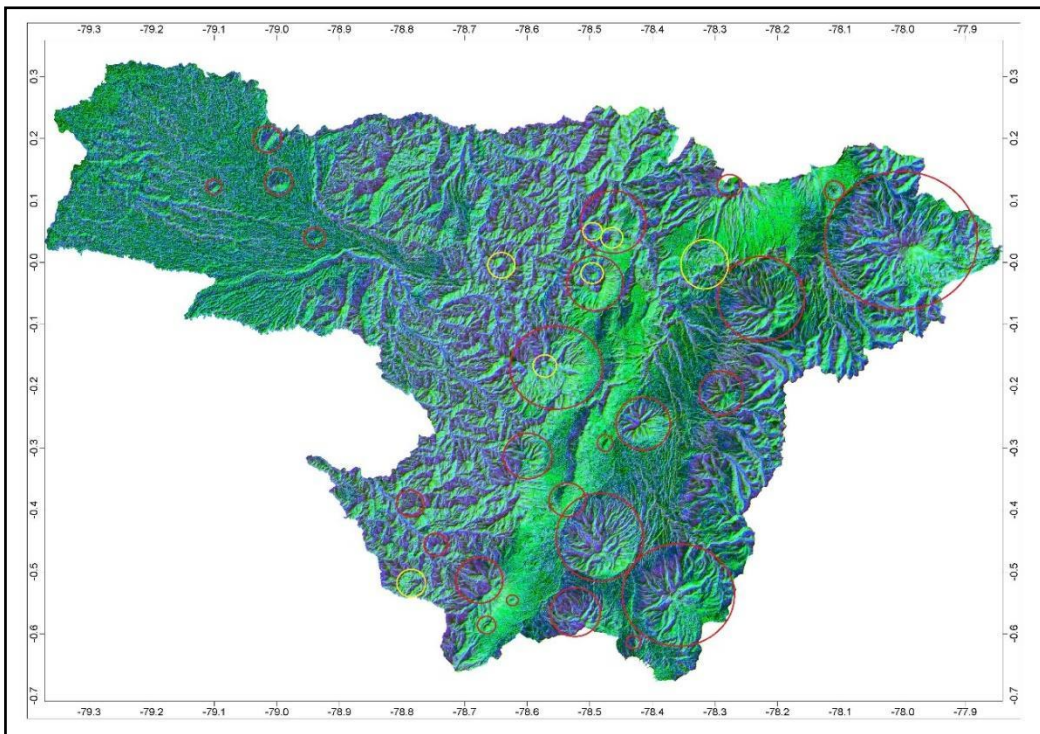


Figura 7. Composición temática land_concav_hillshading_concav. Fuente: Elaboración propia (SAGA 7.8.2).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio permitió definir que, en la zona norte del valle interandino y de la parroquia Guayllabamba, se encuentra un sitio con topografía negativa, limitado por escarpes con forma semicircular y atravesado por el río Pisque, que lo divide en dos secciones.

En la margen derecha del río Pisque se localiza el parque recreacional Jerusalem, limitado al norte por un escarpe semicircular, el cual se considera como parte de una posible geforma circular

denominada en adelante como geforma circular noroeste; mientras que en la margen izquierda se localiza el poblado de Guayllabamba y al norte de éste se ubica un área que presenta características de una geforma circular, denominada en adelante como geforma circular sureste. El análisis discriminó estas zonas de posibles edificios volcánicos y sus ventos, de igual manera se determinaron la existencia de fallas geológicas que pudieron influir en dichas estructuras, lo cual permite definir futuros temas de investigación al respecto (Figura 8).

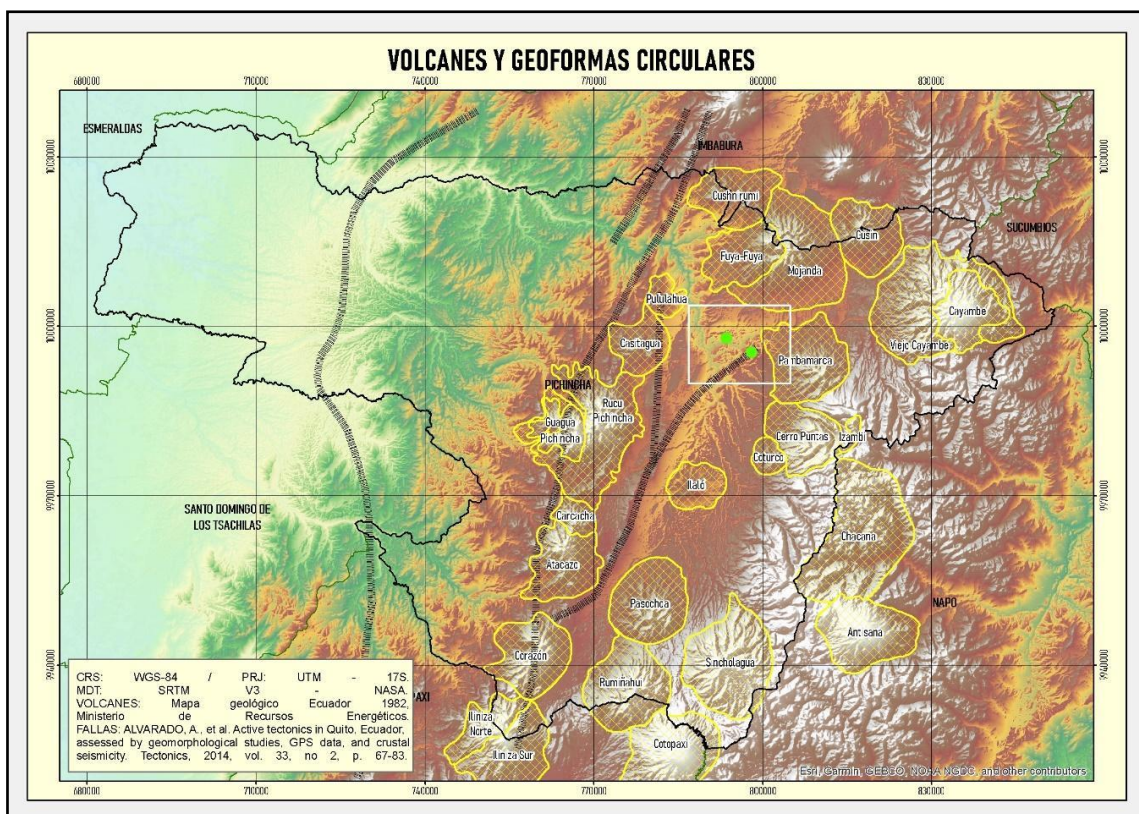


Figura 8. Volcanes y geformas circulares identificadas. Elaboración propia (ArcMap 10.5).

GEOFORMA CIRCULAR NOROESTE.

La vertiente sur del complejo volcánico Fuya Fuya se visualiza como una meseta de pendiente aproximada del 5%, sobre este rasgo geomorfológico se localiza el poblado de Malchinguí; siguiendo hacia el sur esta topografía relativamente plana se ve cortada abruptamente por un salto estructural, configurado por un escarpe

semicircular cuya altura inicia en 2.500 msnm. aproximadamente, y desciende hasta los 2.360 msnm. El interior de la estructura se ha conservado debido a la declaración de la zona como Parque Recreacional y Bosque Protector Jerusalem; esta zona se la dividió en tres secciones considerando las particularidades geomorfológicas existentes, sección oeste, sección central y sección este (Figura 9).

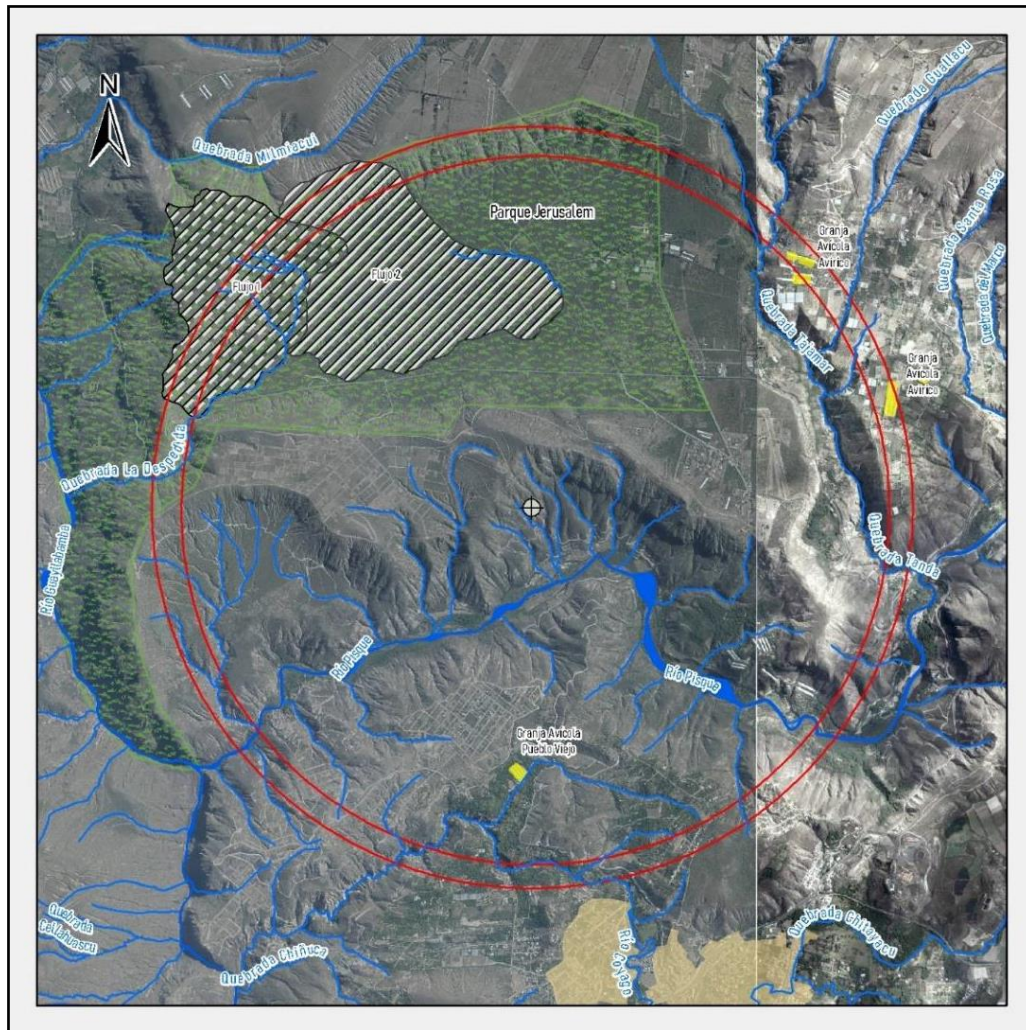


Figura 9. Geoforma circular noroeste. Elaboración propia (ArcMap 10.5).

La estructura hacia el sur está limitada por un levantamiento posiblemente originado de un proceso tectónico cuyo rumbo aproximado es E10°N, esta estructura reduce el valle interior hacia el oeste, mientras que el valle llega hasta el río Pisque en el este. El levantamiento hacia el sur está flanqueado por el río Pisque, y en la margen izquierda del río la estructura de la geoforma está completamente deformada; sin embargo, mediante teledetección fue posible definir el límite circular de la misma.

La sección oeste tiene rasgos notorios, el primero se localiza cerca de la confluencia del río Pisque con el río Guayllabamba, donde se aprecia un escarpe semicircular asociado a procesos erosivos desarrollando en su interior un sistema de drenajes que discurre hacia el río Pisque. Hacia el norte de

la anterior estructura y bajando del escarpe semicircular se encuentra un área de abanicos aluviales, sobresaliendo una estructura semiesférica en la parte central de los flujos; hacia el este de los flujos y subyacente a los anteriores, existe un antiguo abanico que cubre la mayor parte de la sección oeste y que presenta al menos dos escarpes cuya dirección aproximada es E10°N.

La sección central se define como el área inmediatamente contigua a los flujos aluviales, al este está limitada por la quebrada Tajamar que luego toma el nombre de Tanda cuando confluye al río Pisque, al sur la limita el levantamiento tectónico y el río Pisque, y al norte se encuentra definida por el escarpe. Esta sección tiene una pendiente aproximada del 3%, en su parte norte se localiza la entrada al parque recreacional Jerusalem; la zona

no muestra mayores alteraciones, aunque en el sector este se observa su parcelación.

La sección este es una pequeña planicie de forma triangular con una pendiente media aproximada del 3% localizada al este de la quebrada Tanda, hacia el sur confluyen la quebrada Tanda con el río Pisque y hacia el norte se eleva la vertiente sur de una planicie que se encuentra incizada por varios drenajes. En esta sección se observa un gran desarrollo agrícola, lo cual ha borrado prácticamente las huellas de las geoformas; sin embargo, mediante procesos de teledetección se determinó que existe una continuidad de la geoforma.

Con la finalidad de determinar la fisonomía circular que define a la geoforma se consideró el rasgo topográfico de la corona del escarpe y los rastros encontrados mediante teledetección, estas huellas fueron unidas con una circunferencia ajustada a la

estructura de perímetro igual a 19,96 km y diámetro de 6,35 km.

A partir de un radio que cruza la sección central, considerándola como la zona menos alterada, se determinó la pendiente del escarpe en 32° , la altura de la corona del escarpe en 2.496 msnm, la altura del pie del escarpe en 2.357 msnm, y la altura media al interior de la geoforma en 2.285 msnm. Lo cual nos determina que existe una profundidad relativa de 211 m, estimando una relación de profundidad - diámetro correspondiente a 1:30.

GEOFORMA CIRCULAR SURESTE.

La geoforma circular sureste se ubica en la vertiente occidental de la loma de Pambamarca, similar a la anterior geoforma, la planicie al pie de la loma presenta un salto estructural hacia una zona más baja; sin embargo, este sector presenta una gran actividad agrícola, mayor erosión y el retroavance de los escarpes (Figura 10).

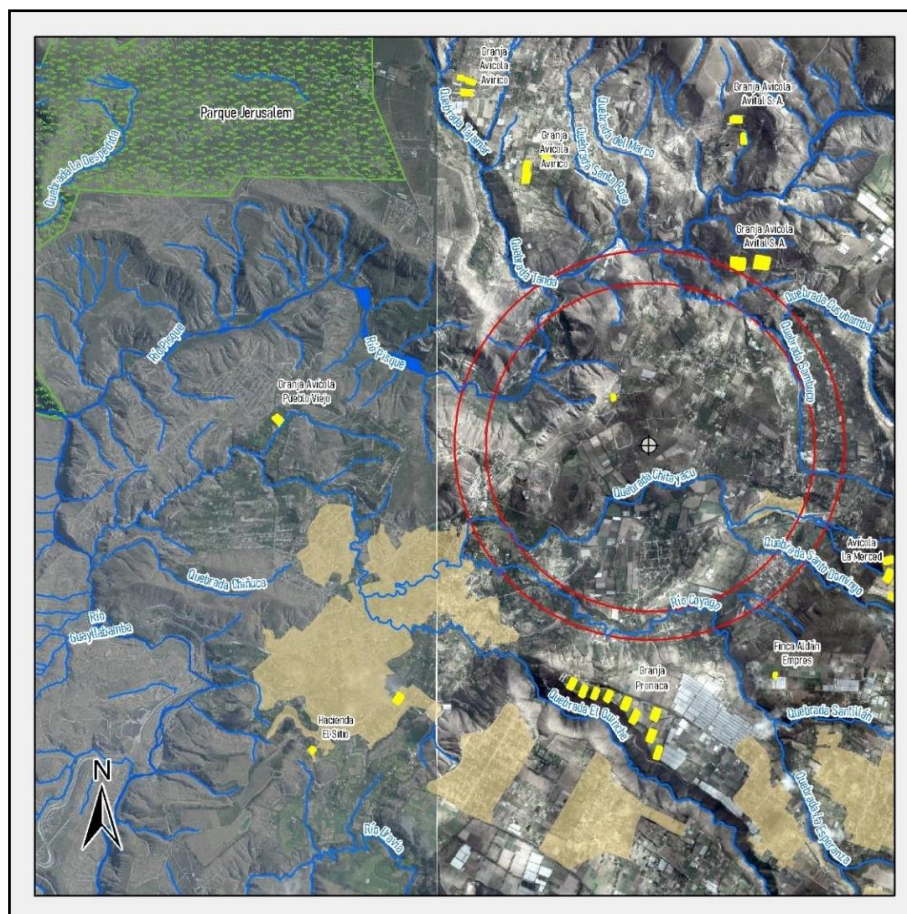


Figura 10. Geoforma circular sureste. Elaboración propia (ArcMap 10.5).

En la parte oeste se observa que la ribera del río Guayllabamba se encuentra elevada respecto de la parte interna, esta estructura podría haber surgido debido a la actividad tectónica del sitio presentando una dirección N15°E. Aproximadamente a una distancia de 1 km hacia el este, se ubica otra estructura casi paralela a la anterior configurando una loma alargada, ésta se corta en su parte sur y luego de un espacio de 300 m aparece una loma con cima redondeada, la cual ha sido utilizada para construir dos reservorios de agua. En general toda la zona interna se presenta como una superficie ondulada, producto de la erosión hídrica y suavizada por la actividad agrícola; sin embargo, es notorio la existencia del salto entre el valle y la planicie de la vertiente occidental de la loma Pambamarca

Considerando los rasgos descritos, tentativamente se estima la posible existencia de un desplazamiento hídrico que atravesó esta zona, generando la morfología semicircular y erosionando el área donde actualmente se ubica el poblado de Guayllabamba, producto de lo cual se tiene la topografía negativa actual. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que dicha erosión pudiera estar asociada a la generación de un cráter de impacto, la posterior formación de una laguna y el desfogue violento en dirección al río Guayllabamba generando la fuerte erosión existente.

La fuerte erosión de la zona no permite la determinación exacta de la ubicación inicial de los escarpes, de igual manera la actividad agrícola ha ocasionado que los rasgos de la estructura se encuentren difuminados en el entorno. Mediante procesos de teledetección se determinaron las huellas de la posible corona y el pie del escarpe, a partir de estos rasgos se generó una circunferencia representativa de esta fisonomía.

Se determinó la presencia de una fisonomía circular cuyo perímetro es 15,37 km y el diámetro es 4,98 km. Con la finalidad de determinar la profundidad de la estructura se consideró la altura de la meseta junto a la estructura, ubicada cerca del poblado de Ascáubi con un valor de 2.503 msnm., así como el valor del posible pie del escarpe localizado a 2.302 msnm., lo cual permite inferir una profundidad de 201 m y una relación de profundidad - diámetro de 1:25.

CONCLUSIONES

Las geoformas superficiales son el resultado de procesos naturales asociados a la interacción de factores geológicos (litología, fallas-sismos, entre otros), hidrometeorológicos (lluvias), biológicos (cobertura del suelo) y antrópicos (uso del suelo), por lo cual, estas estructuras pueden estar activas mientras las condiciones constructivas no cambien. Con esta premisa, es importante estudiarlas con el fin de entender su génesis para determinar si pueden convertirse en una amenaza para la población, los medios de producción o el medio ambiente.

Hasta la actualidad, ninguna de las metodologías automatizadas desarrolladas para el trazado de geoformas del relieve, mediante sistemas de información geográfica a partir de un modelo digital de terreno, se enfocan en el estudio de geoformas específicas, como las geoformas circulares con topografía negativa que pueden estar asociadas a eventos geológicos activos; por lo tanto, el procedimiento generado en este estudio permite una primera aproximación a la identificación y obtención de los resultados deseados.

La aplicación de esta primera metodología en la provincia de Pichincha ha permitido reconocer los ventos en los cráteres de los edificios volcánicos, una gran zona de erosión con una estructura de topografía negativa al noreste del valle interandino, la cual requiere de mayores estudios para determinar su posible génesis.

En base al estudio realizado, se constata la necesidad de determinar un procedimiento automático que permita identificar las estructuras objetivo de manera automatizada, mediante el uso de sistemas de información geográfica.

BIBLIOGRAFÍA

Bartali, R., Dobarganes, J., Pérez, P., & Rico, C. (2018). Asteroides, cráteres de impacto y recursos naturales. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/328812918_Asteroides_Crateres_de_Impacto_y_Recursos_Naturales

Benito-Calvo, A., Gutiérrez, F. J., Carbonel, D., Desir, G., Guerrero, J., Magri, O., & Fabregat González, I. (2016). Measuring deformation related to active sinkholes with ground-based 3D laser

- scanner. A case study in the evaporite karst of the Ebro Valley, NE Spain. Málaga: Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: <http://cir.cenieh.es/handle/20.500.12136/722>
- Bologaro-Crevenna, A., Torres-Rodriguez, V., Sorani, V., Frame, D., & Ortiz, M. A. (2005). Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology*, 67, 407-422. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.007>
- Carricondo, J. (2010). La provincia de Ciudad Real como recurso didáctico en el ámbito de la geología. Valoración de la actividad didáctica desarrollada en los museos y centros de interpretación. Universidad de Granada, Departamento de Didáctica y Organización Escolar. Granada. Disponible en: <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/15713/19492212.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- De Pedraza Gilsanz, J. (1996). Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. Madrid: Editorial Rueda. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Javier-De-Pedraza/publication/235864020_Geomorfologia_Principios_Metodos_y_Aplicaciones_Texto/links/5ebbb2bc299bf1c09ab944cf/Geomorfologia-Principios-Metodos-y-Aplicaciones-Texto.pdf
- Duque Escobar, G. (2022). Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pichincha (GADPP). (2015). Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Disponible en: https://www.emaseo.gob.ec/documentos/lotaip_2015/s/actas_y_resoluciones/Plan_Metropolitano_De_sarrollo_y_Ordenamiento_Territorial_DMQ_2015_2025.pdf
- Griem, W. (2020). Geología Estructural Virtual. Apuntes Geología Estructural y Tectónica. Disponible en: <https://www.geovirtual2.cl/Geoestructural/Intro01.htm>
- Junko, I., & Pike, R. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86, 409-440. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- López, D. (2006). Desarrollo e implementación de un modelo para la clasificación automática de unidades de relieve a partir de modelos digitales de elevación. CENTROGEO, México. Disponible en: <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/15>
- Pike, R. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20, 491-511. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Ulloa, A., Aguilar, T., Goicochea, C., & Ramírez, R. (2011). Descripción, clasificación y aspectos geológicos de las zonas kársticas de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 45, 53-74. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i45.1910>