

Estudio morfométrico para la determinación de morfoalineamientos en el área de Mayarí, Cuba

Morphometric study to determine morphological alignments in the Mayarí area, Cuba

Sergio Greenidge-Moro^{1*}, Yuri Almaguer-Carmenates², Amalia B. Riverón-Zaldivar³

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Holguín Sede José de la Luz y Caballero. Avenida de los Libertadores, km 287 Reparto Pedro Díaz Coello, 80 100, Holguín, Cuba.

² Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Universidad Autónoma de Coahuila, México. Calle Boulevard Adolfo López Mateos, s/n. Nueva Rosita, municipio San Juan de Sabinas, 26809, Coahuila, México.

³ Departamento de Geología, Universidad de Moa. Avenida Calixto García Iñiguez No. 15 entre Avenida 7 de diciembre y Calle Reynaldo Laffita Rueda. Reparto Caribe, 83 330, Moa, Holguín, Cuba.

* Autor para correspondencia: (S. Greenidge-Moro) sgmoro.13@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Greenidge-Moro, S., Almaguer-Carmenates, Y., Riverón-Zaldivar, A., 2023, Estudio morfométrico para la determinación de morfoalineamientos en el área de Mayarí, Cuba: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (1), A281122. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n1a281122>

Manuscrito recibido: 25 de Enero de 2022.
Manuscrito corregido: 29 de Agosto de 2022.
Manuscrito aceptado: 9 de Noviembre de 2022.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El Mapa Geomorfológico de la República de Cuba a escala 1: 100 000, es uno de los proyectos desarrollados por el país para aumentar el grado de conocimiento geológico y optimizar el aprovechamiento de los recursos y condiciones naturales. El mapa lo conforman varias hojas topográficas, entre ellas se encuentra la de Mayarí 5077; la misma posee una elevada complejidad geólogo-estructural, lo que hace necesario profundizar en su conocimiento morfotectónico. Es por ello que se realiza la identificación y caracterización de morfoalineamientos, a partir de métodos morfométricos, análisis de la red de drenaje superficial y fotointerpretación. Los elementos lineales fueron extraídos, empleando el Sistema de Información Geográfica QGIS v3.16, y posteriormente superpuestos y correlacionados para obtener un Mapa final. Se determinó el número, longitud, orientación y densidad de los morfoalineamientos. Como resultado se identificaron 249, con una longitud promedio de 1422 m, orientación predominante N 40° – 50° E y secundaria N 50° – 60° E, asociadas a fallas laterales normales, pertenecientes al principal sistema de fracturación en la región, la dirección Nipe (NE – SO). Además, el análisis de su densidad permitió definir que las laderas noroeste de la Sierra de Nipe, y la zona de articulación de este grupo montañoso con la Sierra Cristal, constituyen las áreas de mayor debilidad tectónica, marcadas por elementos lineales preferentemente diagonales, que siguen la orientación de fallas y límites de morfoestructuras. La génesis del relieve del área de estudio está fuertemente condicionada por estructuras tectónicas, que han influido directamente en la intensidad de la actividad exogenética

Palabras clave: lineamientos, morfoalineamientos, estructura morfotectónica, geomorfología.

ABSTRACT

The Geomorphological Map of the Republic of Cuba at a scale of 1: 100 000, is one of the projects developed by the country to increase the degree of geological knowledge and optimize the use of natural resources and conditions. The map is made up of several topographic sheets, among them is Mayarí 5077; it has a high geological-structural complexity, which makes it necessary to deepen its morphotectonic knowledge. For this, the identification and characterization of morphoalignments is carried out, based on morphometric methods, analysis of the surface drainage network and photointerpretation. The lineaments were extracted in the Geographic Information System QGIS v3.16, these were superimposed and correlated to obtain a final Map. The number, length, orientation and density of morphoalignments were determined. As a result, 249 lineaments were identified with an average length of 1422 m, predominant orientation N 40° - 50° E and secondary N 50° - 60° E, associated with normal lateral faults, belonging to the main fracturing system in the region, the Nipe direction (NE - SW). In addition, the analysis of its density made it possible to define that the northwest slopes of the Sierra de Nipe, and the articulation zone of this mountainous group with the Sierra Cristal, constituting the areas of greatest tectonic weakness, marked by linear elements, preferably diagonal, which follow the orientation of faults and limits of morphostructures. The genesis of the relief of the study area is conditioned by tectonic structures, which have directly influenced the intensity of the exogenetic activity.

Keywords: lineament, morphoalignment, morphotectonic structure, geomorphology.

1. Introducción

Los morfoalineamientos son rasgos notorios y alineados del relieve, de configuración rectilínea o curvilínea, que pueden llegar a ser circulares, con diferentes dimensiones que responden, por lo general, a un fenómeno estructural geológico de variado origen y disímiles características, donde se concluye que los elementos circulares vistos en definición del segmento de imagen, presentan iguales características morfológicas que el resto de las estructuras lineales o sinuosas (Díaz-Barrios, 2016).

El mapeo de los morfoalineamientos ha sido empleado exitosamente en estudios de geología estructural (Sánchez-Serrano *et al.*, 1996; Suzen y Toprak, 1998; Paranhos-Filho *et al.*, 2013; Pirasteh *et al.*, 2013; Arora *et al.*, 2018; Meixner *et al.*, 2018; Nkono *et al.*, 2018) exploración mineral, petróleo, emplazamientos de instalaciones de energía nuclear (Woodall, 1993; Karnieli *et al.*, 1996; Mostafa y Zakir, 1996; O'Driscoll y Campbell, 1996; Cruz-Toledo *et al.*, 2015; Farahbakhsh *et al.*, 2020) (Prasad *et al.*, 2013), investigaciones sobre agua superficial y subterránea (Kim *et al.*, 2004; Pérez-Corona *et al.*, 2017; Ahmed *et al.*, 2019; Ukpai *et al.*, 2020), evaluación de peligros (Trallit *et al.* 2005; Ordaz-Hernández *et al.*, 2013) y estudios geológicos y de otro tipo (Hung *et al.*, 2005; Hashim *et al.*, 2013; Jawahar-Raj *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2018; Prabhakaran y Jawahar-Raj, 2018).

En la extracción de las alineaciones tectónicas, las técnicas de teledetección, los Modelos de Elevación Digital (MED) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituyen herramientas imprescindibles. En los SIG, hay dos métodos fundamentales para la identificación de morfoalineamientos, la extracción automática (p.ej. Wladis, 1999; Ghazi-Thannoun, 2013; Sedrette y Rebai, 2016; Masoud y Koike, 2017) mediante el uso de diferentes algoritmos, y la digitalización manual (p.ej. Sarp y Toprak, 2007; Gallegos *et al.*, 2008; Fernández de la Vega-Márquez y Prol-Ledesma, 2011), mediante la interpretación visual.

La primera proporciona todas las características disponibles en un área, las cuales incluyen tanto las estructuras lineales naturales como las antrópicas. En el caso de la segunda, el investigador puede elegir características naturales o antrópicas según los requisitos de la investigación (Das y Pardeshi, 2018) y el resultado está asociado a las habilidades del investigador (Ahmadi y Pekkan, 2021). La extracción manual de morfoalineamientos es más común cuando el objetivo se limita a buscar solo características geológicas (Das *et al.*, 2018), o para extraer más información sobre su distribución y naturaleza (Nagal, 2014).

El empleo de los MED y sus datos derivados, como pendiente, dirección de la pendiente, el patrón hidrográfico y los relieves sombreados (Onorati *et al.*, 1992), es muy común en las investigaciones geólogo – geomorfológicas, estos suelen usarse ya sean solos (p.ej. Jordan *et al.*, 2005; Gallegos *et al.*, 2008; Abdullah *et al.*, 2010; Jawahar-Raj *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2018; Prabhakaran y Jawahar-Raj, 2018) o en combinación con datos de teledetección (p.ej. Marghany *et al.*, 2006; Mogaji *et al.*, 2011; Nkono *et al.*, 2018; Ahmed *et al.*, 2019; Ukpai *et al.*, 2020), lo cual es más usual. Chorowicz y otros (1991) usaron un MED para calcular el rumbo y el buzamiento a partir de un mapa geológico (Jordan *et al.*, 2005). Onorati y otros (1992), utilizan los mapas derivados de un MED (pendiente, dirección de la pendiente y relieve sombreado) para investigar el escenario geomorfológico y las principales características geoestructurales del centro y sur de la Península italiana. Koike y otros (1998) calcularon la geometría de un plano de falla a partir de un MED; Oguchi y otros (2003), emplean los mapas sombreados para descubrir una falla activa en los Alpes japoneses. Ganas y otros (2005) utilizan dos MED de distinta escala para identificar fallas activas en Ática, Grecia central. La aplicación de los MED ha demostrado que estos permiten un análisis más detallado, profundo y rápido de las estructuras lineales (Badura y Przybylski, 2005).

Cuba no cuenta con un mapa geomorfológico unificado y detallado a escala 1: 100 000, que

sirva de soporte a la planificación de soluciones a los problemas de obras públicas, erosión, medio ambiente, agricultura y riesgo geológico; es por ello que se generó un proyecto con este objetivo. El área de estudio se ubica en la región oriental cubana, particularmente compleja por su geodinámica muy activa y su historia evolutiva. En esta región los movimientos horizontales y verticales de la corteza, y su diferenciación en bloques morfotectónicos, a través de diversas estructuras disyuntivas, han sido determinantes en la generación de topografía (Hernández-Santana *et al.*, 1991b). Ante la necesidad de caracterizar los rasgos físicos, estructurales y dinámicos del relieve de la región y del área de estudio, se requiere de nuevos estudios morfotectónicos que evalúen la tectónica activa de cada área, para establecer de forma coherente la relación entre las morfoestructuras que condicionan el relieve y los procesos geomorfológicos actuantes. En tal sentido, la extracción de morfoalineamientos, ofrece información útil al mapeo geomorfológico.

Por lo anterior, a partir de una digitalización manual en SIG, empleando un MED, sus datos derivados y la interpretación de una imagen satelital, se realiza la identificación y caracterización de morfoalineamientos. Se determina su número,

longitud, densidad y principales orientaciones, con el fin de contribuir al conocimiento geodinámico y cartografiado geomorfológico de la Hoja Mayarí 5077, perteneciente al proyecto nacional del Mapa Geomorfológico de la República de Cuba a escala 1: 100 000.

1.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La hoja topográfica Mayarí a escala 1:100 000 se localiza en la parte centro – este de la provincia Holguín. Limita al norte con la Bahía de Nipe, el Océano Atlántico, los municipios Banes y Antilla; al sur con la provincia de Santiago de Cuba; al este con municipio Frank País y al oeste con los municipios Cueto y Báguanos (Figura 1).

La elevada complejidad geológica del área de estudio se manifiesta en su gran variedad litológica y morfoestructural. En ella se integran el substrato plegado y el neotóctono; los dos niveles estructurales que dividen la geología de Cuba (Iturralde-Vinent 1998). Estos niveles comprenden las rocas de la Asociación ofiolítica mesozoica, Arco volcánico del Cretácico Superior, Arco volcánico paleogénico Sierra Maestra – Cresta Caimán, Cubierta sedimentaria del arco Sierra Maestra – Cresta Caimán y Cubierta eocénico – cuaternaria (Figura 2).

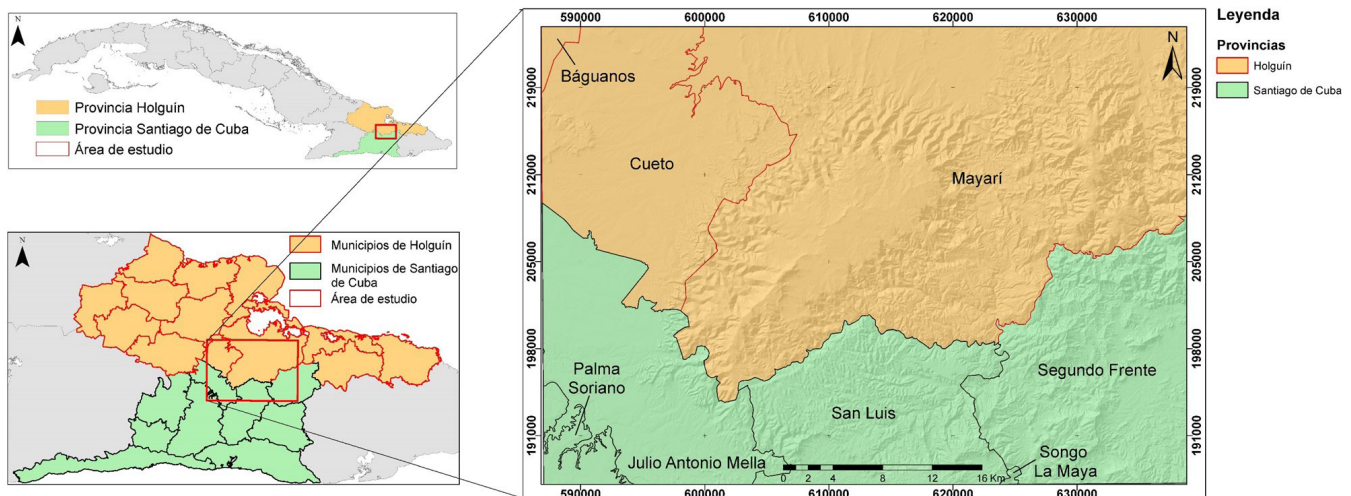


Figura 1 Ubicación geográfica del área de estudio.

El área de estudio pertenece al sistema montañoso Sierra Nipe – Cristal – Baracoa, localizado en la unidad neotectónica Oriental (Cotilla-Rodríguez, 1998). En este complejo orográfico Nagy y otros (1976) distinguen tres sistemas de fracturas y de orientación: a) la dirección prelarámica (probablemente subherciniana), con el rumbo NNE–SSO; b) la dirección cubana con su rumbo ONO–ESE, que se representa por fallas normales y por la orientación de los napes ultramáficas; c) la dirección Nipe, cuyo rumbo es NE – SO y que se representa por fallas laterales y normales.

Hernández-Santana y otros (1995) consideran que el sistema de fracturación conjugado de dirección NE – SO (dirección Nipe), así como la activación de fallas de orientación NO – SE, es el resultado del mecanismo geotectónico de desplazamiento lateral de izquierda a lo largo de la zona de sutura Bartlett – Caimán, el cual jugó un papel determinante en la consolidación geoestructural de Cuba oriental. Esta región, en su etapa Plio-Cuaternaria se destacó por un predominio de los movimientos verticales, determinantes en la formación del orógeno actual.

La red drenaje superficial es densa y se divide en dos sectores: la zona llana y la zona montañosa. La primera se caracteriza por un sistema de drenaje condicionado por la actividad antrópica, debido a la siembra de caña. Presenta tres embalses de gran envergadura, donde desembocan la mayoría de los ríos; sus patrones de drenaje son dendrítico, paralelo y subparalelo con direcciones predominantes de SO – NE, SE – NO y O – E. La segunda muestra configuraciones del drenaje de tipo rectangular, enrejado, radial, subparalelo y dendrítico, los cuales revelan el control tectónico estructural a que está sometido el territorio. Las aguas corren preferentemente en dos direcciones O – E y E – O, tributando a los ríos Mayarí y Levisa, los de mayor orden en la zona, que corren de sur a norte.

2. Materiales y métodos

La confección del mapa de morfoalineamientos siguió un proceso secuencial a partir de dos criterios que incorporan progresivamente información. El primer criterio aplicado es el bibliográfico

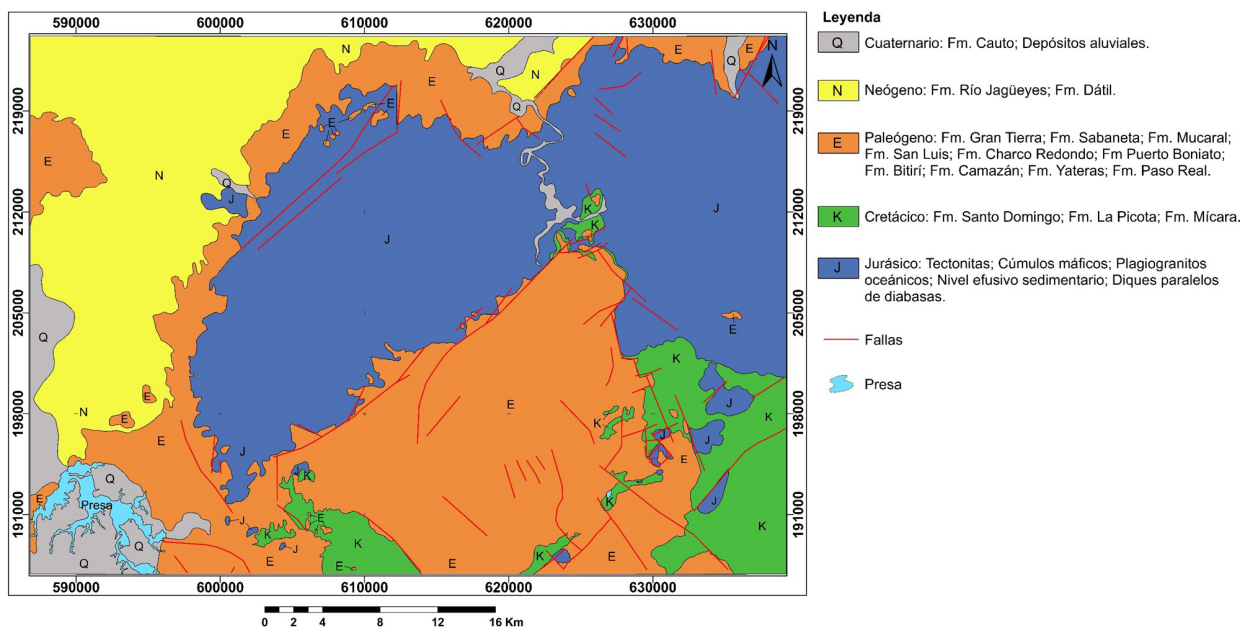


Figura 2 Esquema geológico del área de estudio. Modificado de Instituto de Geología y Paleontología, Cuba.

que comprende la recopilación de las cartografías geológicas existentes donde se representan las trazas de posibles fracturas, morfoalineamientos, discontinuidades morfoestructónicas, así como información geólogo-geomorfológica en general (p.ej. Nagy *et al.*, 1976; ACC e IGP, 1988; Portela-Peraza *et al.*, 1989; Díaz-Díaz *et al.*, 1990; Cotilla-Rodríguez, 1998; Hernández-Santana *et al.*, 1991b; Hernández-Santana *et al.*, 1995). El segundo criterio, se basa en el análisis morfométrico del MED (Paredes *et al.*, 2006), y su combinación con imagen satelital para crear un mapa estereoscópico.

A partir del procesamiento del MED se generaron los mapas de pendiente, red de drenaje superficial, superficies del nivel base de erosión (isobases) hasta el 4 orden, mapas sombreados con dos direcciones acimutales de iluminación de 135° y 45° (iluminación vertical fija de 45°), y la imagen estereoscópica. A cada mapa se le realizó una interpretación visual de los morfoalineamientos regionales, según los siguientes criterios de reconocimiento: valles rectos, escarpes continuos, cambios bruscos de pendientes y de dirección de las corrientes fluviales, variaciones tonales repentinas, alineaciones morfológicas y de la vegetación. Los morfoalineamientos obtenidos fueron superpuestos y correlacionados para obtener un Mapa final. Aquellos morfoalineamientos con criterios geomorfológicos significativos y/o cuyo trazado era marcado en dos o más mapas, fueron incluidos en el mapa final; y posteriormente contrastados con las fallas del mapa geológico (Figura 2). Los que coincidían con estas últimas, se eliminaron, por constituir estructuras geológicas comprobadas.

La metodología empleada permite la obtención de un mapa a partir del trazado de morfoalineamientos en varios mapas previos y su respectiva correlación, lo cual simplifica el análisis, según Mira-Carrión y otros (2016). Además, es uno de los métodos más utilizados en las investigaciones con extracción manual de morfoalineamientos (p.ej. Gallegos *et al.*, 2008; Fernández de la Vega-Márquez y Prol-Ledesma, 2011; Scheiber *et al.*, 2015; Das y Pardeshi, 2018), para disminuir o evitar la subjetividad de los resultados.

A todos los morfoalineamientos se les determinó su longitud, rumbo, y direcciones principales con los

diagramas de rosas generados en el software Dips v.7. Se crearon mapas de densidad de morfoalineamientos para discernir las áreas que, según estos patrones estructurales, presentan una actividad tectónica más intensa. Estos elementos lineales son más frecuentes en terrenos muy tectonizados, marcan zonas donde progresa la meteorización y se produce un aumento de permeabilidad y porosidad del terreno (Mira-Carrión *et al.*, 2016).

El MED utilizado de una resolución 25x25, se generó en el Surfer v.16 según el procedimiento propuesto por Moreno-Cruz y otros (2017), a partir de la digitalización directa, de tipo vectorial manual con el software AutoCad Map 3D 2016. En el ILWIS v.3.4 se creó la imagen estereoscópica, y con QGIS v3.16. se generaron el resto de los mapas y se digitalizaron todos los morfoalineamientos.

3. Resultados y discusión

En las Figuras 3 y 4 se muestran los mapas estudiados y sus morfoalineamientos, la Figura 5 presenta el Mapa final de morfoalineamientos del área de estudio.

Los mapas de isobases (Figuras 3A, 3B y 3C) marcan los niveles de base de erosión de los ríos de un determinado orden, definido por el tiempo de su formación, denominándose 1 orden a los ríos más jóvenes o de última formación, y sucesivamente serán más viejos a medida que el orden sea mayor. Según Domínguez-González y otros (2007) la interpretación de estos mapas es de gran utilidad en los estudios tectónicos y neotectónicos en particular, y en la evaluación de la intensidad de la erosión en el tiempo. En la investigación se analizaron las isobases de 2, 3 y 4 orden, al no existir suficientes ríos de órdenes superiores en el área de estudio para ofrecer una correcta información de la evolución tectónica del terreno más antiguo. Los morfoalineamientos identificados corresponden a cierres positivos máximos e inflexiones negativas de las curvas de nivel, que coinciden con los límites de morfoestructuras y zonas de máximo levantamiento.

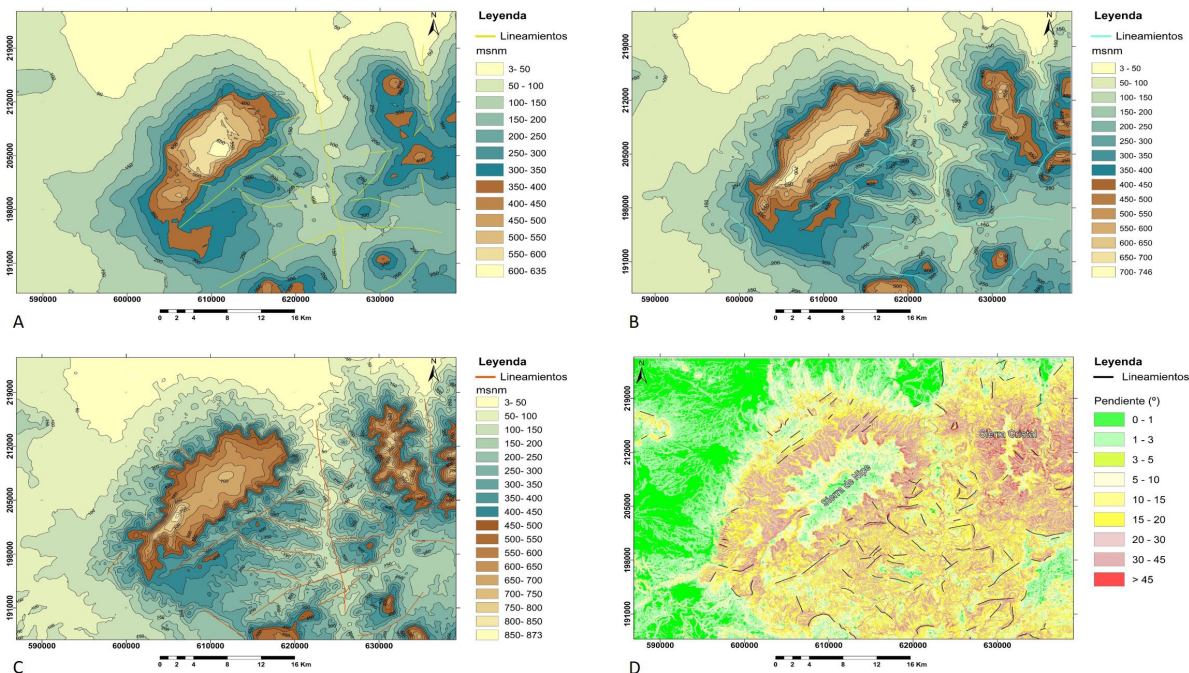


Figura 3 Mapas con sus morfoalineamientos. A: Mapa de Isobases 4 orden, B: Mapa de Isobases 3 orden, C: Mapa de Isobases 2 orden y D: Mapa de pendiente.

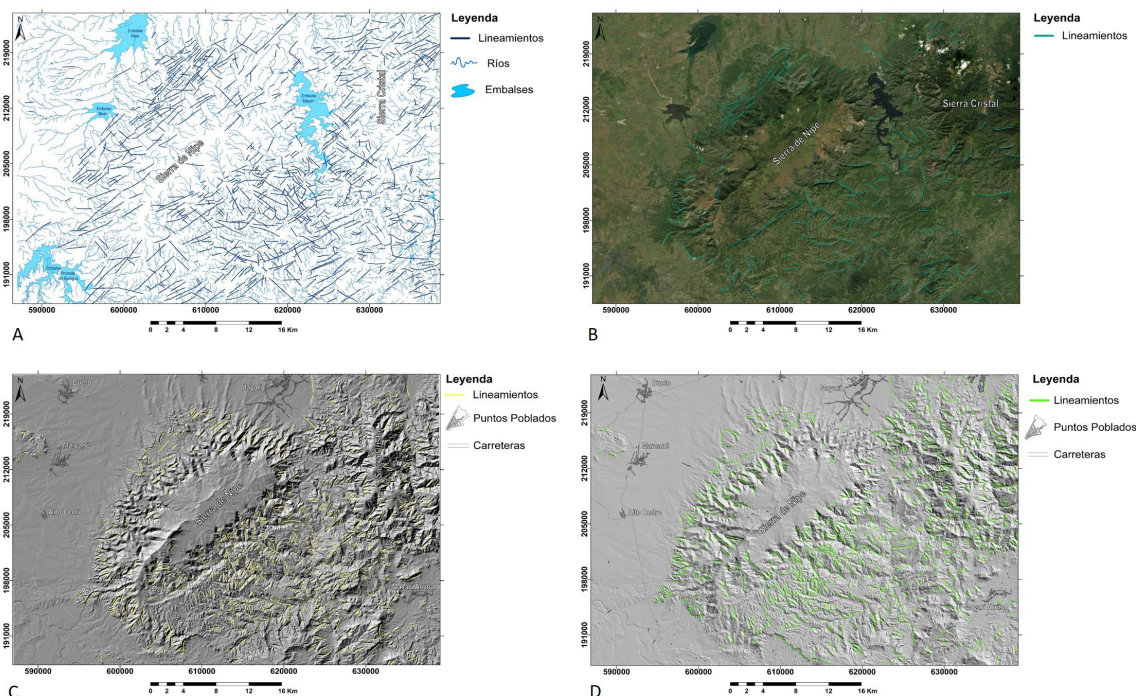


Figura 4 Mapas con sus morfoalineamientos. A: Mapa de red de drenaje. B: Mapa Estereoscópico. C: Mapa sombreado 135° acimut y D: Mapa sombreado 45° acimut.

Tabla 1. Número y longitud de los morfoalineamientos para cada mapa estudiado.

Mapas	Número de morfoalineamientos	Longitud mínima (m)	Longitud máxima (m)
Mapa sombreado 45° acimut	782	175.38	4076.27
Mapa sombreado 135° acimut	729	156.91	4664.90
Mapa de Isobases 4 orden	15	1394.76	31280.83
Mapa de Isobases 3 orden	21	1119.70	25183.85
Mapa de Isobases 2 orden	24	1742.61	26843.34
Mapa de Pendiente	115	563.6	4927.51
Mapa estereoscópico	168	493.55	10938.51
Mapa de Red de drenaje	893	168.20	12431.40
Mapa final de morfoalineamientos	249	525.91	12984.02

El mapa de pendiente (Figura 3D), revela una marcada zonalidad geomorfológica, definida principalmente en dos unidades, llanura y montaña. El predominio de las superficies que superan los 15° de inclinación muestra el control tectónico de la región. Los valores más elevados de pendientes prevalecen en las laderas de las estructuras montañosas fundamentales, la Sierra de Nipe y la Sierra Cristal. Estos valores se asocian esencialmente a escarpes estructurales-erosivos y valles en forma de V, evidencia de la actividad neotectónica y del potencial erosivo. A partir de estos elementos, así como de los cambios bruscos de pendiente, valles rectos encajados y superficies abruptas alineadas, se trazaron los morfoalineamientos en este mapa.

El mapa de drenaje (Figura 4A) muestra los ríos a partir del 2 orden, pero sus morfoalineamientos fueron trazados incluyendo también a los ríos de 1 orden. El área de estudio presenta un buen drenaje con corrientes fluviales que superan el 5 orden. Hacia la porción oeste predomina una configuración paralela y subparalela, relacionada con las bajas pendientes existentes; en el resto del territorio aparecen varios patrones, principalmente: radial, subparalelo, rectangular, enrejado y dendrítico. Estas configuraciones y su variedad, constituyen un reflejo del control tectónico del área, así como de sus significantes cambios litológicos. Los morfoalineamientos identificados se localizan fundamentalmente en las laderas de las Sierra de Nipe y Cristal, y corresponden a cursos rectos, cambios bruscos de dirección de las corrientes flu-

viales, alineaciones de meandros, afluentes y cursos principales.

La Figura 4B muestra la imagen satelital empleada para crear el Mapa estereoscópico, y sus morfoalineamientos. Con esta imagen y el MED se creó el estereopar, generando una conjunción de dos vistas concatenadas, cada una de ellas desplegadas en la pantalla con un color primario (azul y rojo), de tal manera que al usar el anaglifo se genera la visión estereoscópica (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002). La información que ofrece este mapa permite diferenciar los elementos geológicos de los antrópicos, además de cómo estos últimos han potenciado la actividad de procesos exógenos en determinadas áreas. Los elementos lineales identificados responden fundamentalmente a variaciones tonales repentinas, alineaciones morfológicas y de vegetación, escarpes estructurales-erosivos, valles encajados, y valles rectos y con cambios bruscos de dirección.

Se estudiaron dos mapas sombreados (Figuras 4C y 4D) con diferentes acimuts de iluminación, esto, según Scheiber y otros (2015), elimina el sesgo que se produce con un solo acimut. Asimismo, Scheiber y otros (2015) sugieren utilizar al menos dos ángulos de iluminación, perpendicular y paralelo a la tendencia dominante de fractura, por lo que 135° y 45° constituyen las orientaciones más adecuadas para esta investigación. A partir de los cambios de textura, que pueden representar cambios litológicos, la presencia de valles rectos y la relación entre las zonas iluminadas y oscuras, se trazaron los morfoalineamientos.

El número de morfoalineamientos de cada mapa analizado y del mapa final (Figura 5) se presentan en la Tabla 1. Los morfoalineamientos finales del área de estudio son 249, con una longitud total de 348,15 km (Tabla 1). La cantidad en los mapas varía desde 15 (Mapa de isobases 4 orden) hasta 893 (Mapa de drenaje), con una longitud mínima de 156,91 m y máxima de 31280,83 m, en el Mapa sombreado 135° acimut y Mapa de isobases 4 orden respectivamente.

Atendiendo a las longitudes de los morfoalineamientos trazados, se determinaron 5 clases: muy cortos (< 1km); cortos (1-3 km); medios (3-5 km); largos (5-8 km) y muy largos (> 8 km) (Tabla 2). En la Tabla 2 se observa que en los mapas analizados predominan los morfoalineamientos muy cortos y cortos, excepto en los mapas de isobases. En el Mapa de pendiente el 73,9 % de los morfoalineamientos presentan longitudes entre 1 y 3 km, mientras que en los mapas sombreados el 72,3 % (45° acimut) y 76,9 % (135° acimut) presentan longitudes inferiores a 1 km. En el Mapa estereoscópico el 89,88 % de los morfoalineamientos son cortos y en el de drenaje el 49,07 % son cortos y el 42,26 % muy cortos. En el Mapa final el 94,78 % de los morfoalineamientos no superan los 3 km de longitud, y solo 1 llega a ser muy largo, asociado esencialmente a tramos rectos de los ríos,

alineaciones de meandros y cambios bruscos de dirección de las corrientes fluviales (Figura 5). Esta regularidad del predominio de los morfoalineamientos cortos y muy cortos, está asociada fundamentalmente a la escala de trabajo, y también ha sido descrita en otras investigaciones (p.ej. Arlegui y Soriano, 1998; Nagal, 2014; Scheiber *et al.*, 2015; Adiri *et al.*, 2017; Jawahar-Raj *et al.*, 2017); con escalas medias y grandes las longitudes de los morfoalineamientos tienden a ser cortas.

En el caso de los morfoalineamientos extraídos de los mapas de isobases, el 60 % superan los 5 km, contrario a la tendencia de los otros morfoalineamientos trazados. A estos mapas están asociados el menor número de morfoalineamientos y sus mayores longitudes; esto se debe probablemente a que estos mapas reflejan la evolución de morfoestructuras regionales. Así, los elementos lineales que se distinguen tienden a poseer grandes extensiones, que se corresponden con límites de bloques o morfoestructuras regionales. Este tipo de mapas ha sido empleado con éxito en varias investigaciones geomorfológicas y morfotectónicas (Domínguez-González *et al.*, 2007; Barea-Pérez *et al.*, 2010; Rosabal-Domínguez *et al.*, 2016).

Para el análisis de las orientaciones de los morfoalineamientos extraídos se confeccionaron diagramas de rosa (Figura 6). Excepto en el mapa

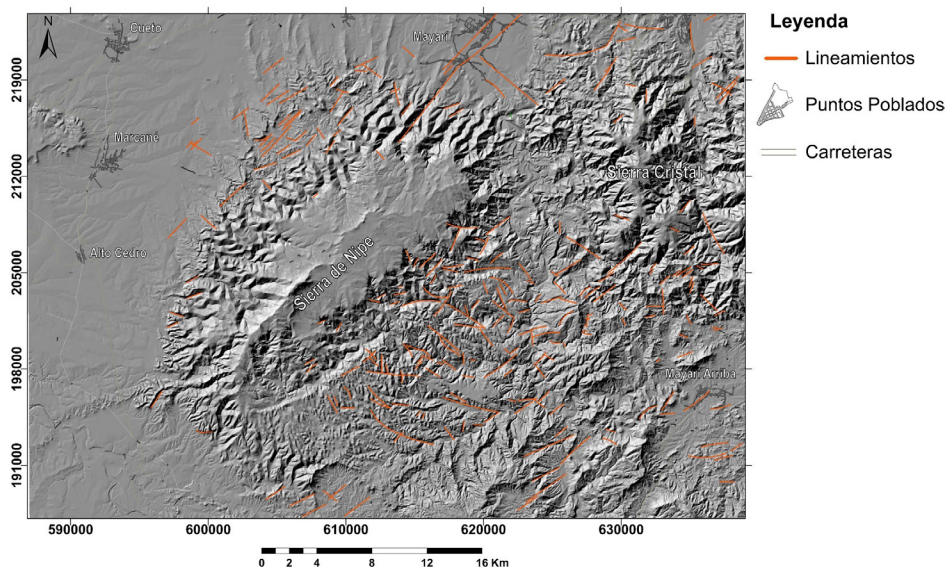


Figura 5 Mapa final de los morfoalineamientos del área de estudio.

Tabla 2. Número de morfoalineamientos para cada clase de clasificación.

Mapas	Clases (km)				
	< 1	1-3	3-5	5-8	> 8
Mapa sombreado 45° acimut	566	211	5	0	0
Mapa sombreado 135° acimut	561	161	7	0	0
Mapa de isobases 4 orden	0	4	2	4	5
Mapa de isobases 3 orden	0	7	1	7	6
Mapa de isobases 2 orden	0	4	5	9	6
Mapa de pendiente	23	85	7	0	0
Mapa estereoscópico	26	151	8	1	2
Mapa de red de drenaje	377	439	61	15	1
Mapa final de morfoalineamientos	99	137	8	4	1

de sombreado 45° acimut y los de isobases, en el resto las direcciones predominantes de los morfoalineamientos se hallan en N 40° – 60° E (Figura 6). En el Mapa sombreado 45° acimut, el ángulo de iluminación horizontal es prácticamente paralelo a la dirección N 40° – 60° E, provocando que las zonas de sombras estén orientadas, en general, perpendicularmente a esta (Figura 6H), por lo que la mayoría de sus morfoalineamientos son ortogonales a la orientación preferencial. No obstante, según Pain (2005), este acimut de iluminación de 45°, permite identificar los rasgos geomorfológicos y visualizar los patrones estructurales del relieve.

El diagrama de rosa del Mapa de isobases 4 orden refleja dos orientaciones principales, N 0° – 10° O y N 80° – 90° E (Figura 6A); de los mapas de isobases este muestra el relieve más antiguo, sus morfoalineamientos marcan esencialmente los límites de las principales morfoestructuras en las que empieza a dividirse el territorio (Figura 3A). La dirección N 0° – 10° O, responde a la evolución de los ríos Mayarí y Levisa, el primero divide la Sierra de Nipe de la Sierra Cristal, y el segundo, más al este, disecta a la Sierra Cristal. Los morfoalineamientos del Mapa de isobases de 3 orden, presentan una orientación principal N 80° – 90° O, y tres secundarias N 70° – 80° O, N 30° – 40° O y N 30° – 40° E (Figura 6B). La dirección principal y la primera secundaria, corresponden primordialmente a inflexiones negativas de las curvas de nivel, que forman ángulos agudos con las direcciones de las mayores morfoestructuras del área.

Las restantes orientaciones secundarias marcan el desarrollo de cierres máximos positivos y de incisiones perpendiculares a la Sierra de Nipe (Figura 3B). El relieve más actual, de los mapas de isobases, lo muestra el de 2 orden, sus morfoalineamientos tienen por dirección principal N 70° – 80° O (Figura 6C), asociada fundamentalmente a límites de bloques morfoTECTÓNICOS, y por secundaria N 40° – 60° E, la orientación preferencial de los otros mapas estudiados. Al ser estos mapas de isobases un reflejo evolutivo del relieve, la diversidad de las orientaciones de sus morfoalineamientos marca múltiples episodios de eventos de deformación. El análisis de las orientaciones de los morfoalineamientos finales propuestos para el área de investigación, permite definir como dirección primaria N 40° – 50° E, y como secundaria N 50° – 60° E (Figura 6D).

La densidad de los morfoalineamientos es definida como la longitud de los morfoalineamientos por unidad de área. Este parámetro brinda una valiosa información sobre la intensidad de la deformación tectónica, agrietamiento y permeabilidad de las rocas, así como potencial de agua subterránea (Das *et al.*, 2018). A todos los mapas de morfoalineamientos se le estimó su densidad (Figuras 7, 8 y 9) para un área de 1 km², y sobre la base de los valores obtenidos se establecieron 5 clases, para facilitar la caracterización del territorio. Las clases se definen en: densidad muy baja (< 0.2 km/km²), baja (0.2 – 0.5 km/km²), moderada (0.5 – 1.5 km/km²), alta (1.5 – 2.5 km/km²) y muy alta (> 2.5 km/km²).

El rango de densidad de morfoalineamientos para el área de estudio es de 0 – 3.8 km/km², el valor máximo se alcanza en los morfoalineamientos de la red de drenaje (Figura 8A). En los mapas de isobases y de pendientes la densidad solo llega a ser moderada (Figura 7), debido al bajo número de morfoalineamientos y a la poca intersección de estos. A medida que los elementos lineales se intersecan aumentan su densidad, revelando zonas

con mayor presencia de estructuras disyuntivas y mayor grado de debilidad y deformación tectónica. En los mapas de isobases, la densidad más alta se concentra en la región limítrofe entre la Sierra de Nipe y la Sierra Cristal (Figuras 7A, 7B y 7C), mostrando patrones lineales y no areales, que responden esencialmente a las características de sus morfoalineamientos: largos, bajo número y poco grado de intersección.

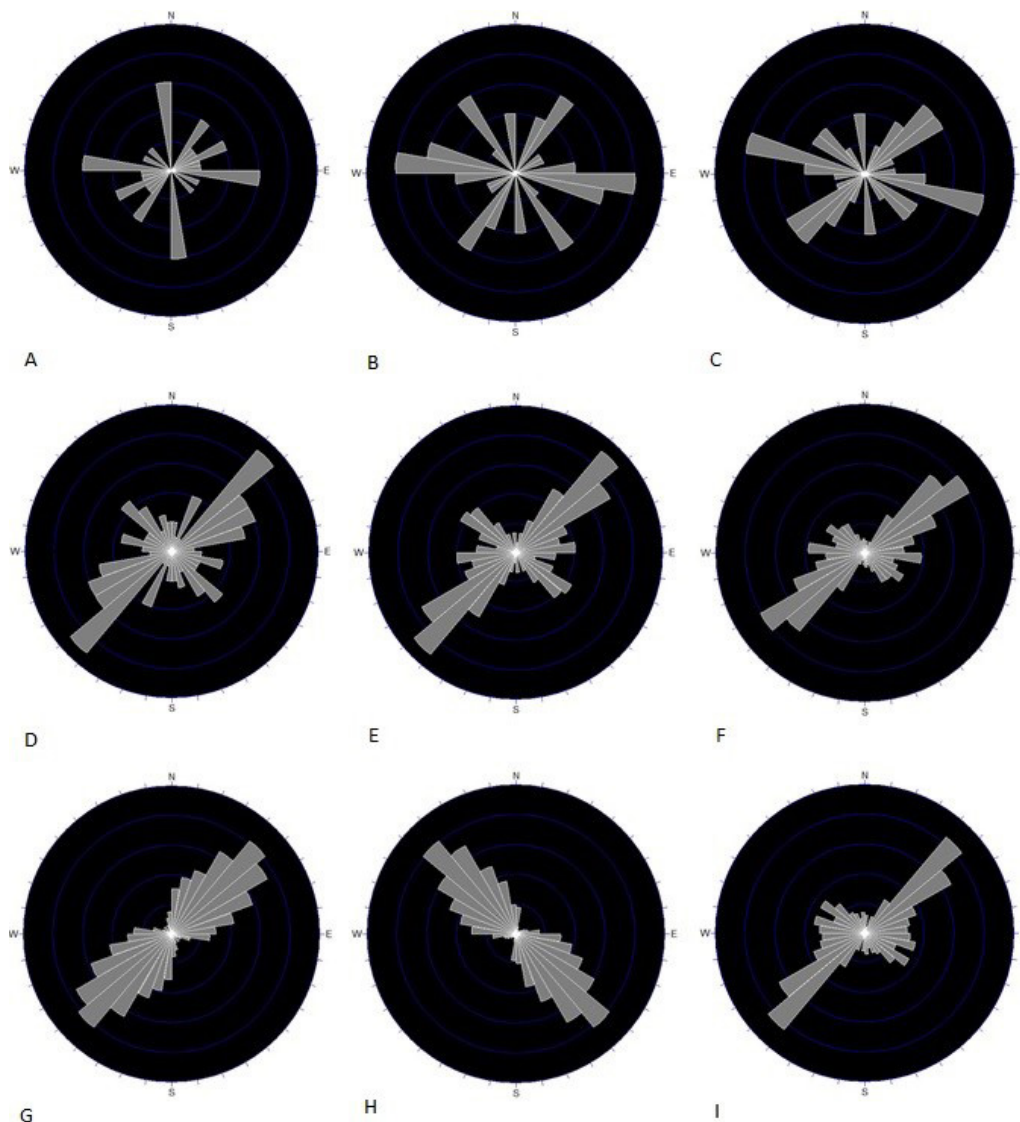


Figura 6 Diagrama de rosa de los morfoalineamientos trazados. A: Mapa de Isobases 4 orden, B: Mapa de Isobases 3 orden, C: Mapa de Isobases 2 orden, D: Mapa de Pendiente, E: Mapa Estereoscópico, F: Mapa de red de drenaje, G: Mapa sombreado 135° acimut, H: Mapa sombreado 45° acimut e I: Mapa final de los morfoalineamientos del área de estudio.

En los mapas de drenaje, estereoscópico y sombreados (Figura 8), la densidad llega a ser alta, y muy alta en el caso del primero (Figura 8A). La Figura 8 muestra que las laderas de la Sierra de Nipe y de la Sierra Cristal son las áreas que poseen una densidad más elevada. Las superficies de menor densidad se asocian principalmente a zonas llanas como la cima de la Sierra de Nipe y la llanura que se extiende en el norte, oeste y suroeste del territorio, donde la estabilidad tectónica ha favorecido un bajo grado de deformación.

La Figura 9 revela que la densidad de los morfoalineamientos finales del área de estudio es muy baja en la zona llana, hacia la zona montañosa es moderada, y de forma puntual alta con valores que no superan los 2.06 km/km², para solo un 0.3 % del área. Según estos valores, se pueden distinguir 3 zonas de mayor deformación tectónica: la ladera noroeste de la Sierra de Nipe, el noreste de la Sierra Cristal, con poca extensión areal, y la zona de articulación entre ambos grupos montañosos. La primera y segunda zona están vinculadas a cúmulos máficos y tectonitas respectivamente, pertenecientes a mantos tectónicos ofiolítico,

intensamente desmembrados (Iturralde-Vinent 1998). La tercera zona, delimitada por fallas, muestra un dominio tectónico diferente que comprende las litologías de las cuencas de piggy-back 2do ciclo (Formaciones Puerto Boniato y Charco Redondo), la serie vulcanógeno – sedimentaria del Arco volcánico paleogénico (Formación Sabaneta) y unidades de la neoplataforma (Formaciones Mucaral y Yateras). Han y otros (2018), plantean que áreas con elevada densidad de morfoalineamientos, usualmente presentan desarrollo de fallas y pliegues. La Figura 9 muestra que las zonas de máxima densidad están asociadas o delimitadas por sistemas de fallas predominantemente diagonales con direcciones NE – SO y NO –SE. Según Hernández Santana y otros (1994) el estilo geotectónico del territorio es de premontañas de bloques en plegamientos y monoclinales, y es la zona de articulación entre los grupos montañosos donde estos bloques presentan una mayor representación superficial. Esto influye directamente en que sea la zona con mayor número de morfoalineamientos finales, con 105, para un 42.1 % de los morfoalineamientos finales identificados.

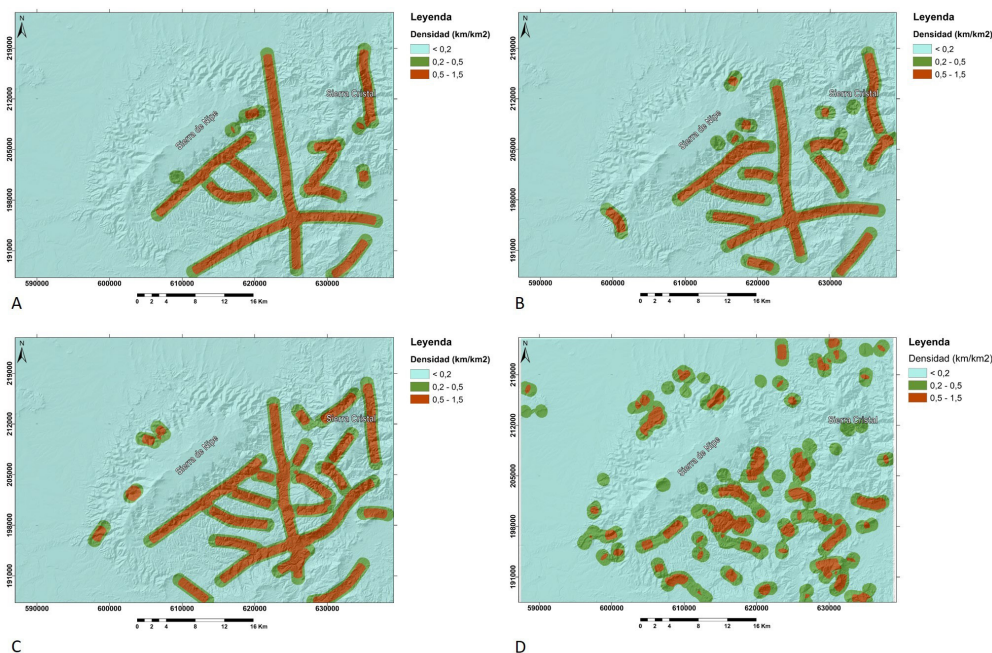


Figura 7 Mapas de densidad de morfoalineamientos. A: Mapa de Isobases 4 orden, B: Mapa de Isobases 3 orden, C: Mapa de Isobases 2 orden y D: Mapa de Pendiente.

El relieve del archipiélago cubano está condicionado por su posición en el arco de las Antillas, en la zona de interacción de las placas de América del Norte y del Caribe. Ello determina la heterogeneidad, complejidad, el carácter y el desarrollo de sus elementos morfoestructurales y morfoesculturales (Furrazola-Bermúdez y Núñez-Cambra, 1997). La región caribeña estuvo sometida a la acción de mecanismos de compresión y tensión durante las etapas mesozoica tardías y cenozoica temprana de su evolución. A partir del Oligoceno, su desarrollo transcurre bajo esfuerzos tectónicos de desplazamiento horizontal a lo largo de sus zonas de interacción septentrional con la Placa de América del Norte y meridional con la Placa de América del Sur (Hernández-Santana *et al.*, 1991a). En este escenario tectónico regional, tiene su conformación el relieve del megabloque cubano.

La evolución geológico – geomorfológica, tanto del área de estudio, como de la región oriental cubana, ha expresado superficialmente varios procesos endógenos a través de elementos lineales y diversas familias de grietas y fallas. El desarrollo neotectónico de Cuba oriental ha determinado un

diverso mosaico de bloques morfoestructurales. Hernández Santana y otros (1991b) plantean que estos, se agrupan en tres macrobloques sublatitudinales: el suroriental montañoso (Sierra Maestra), nororiental montañoso (Sierra Nipe – Cristal – Sagua – Baracoa – Purial) y de depresiones superpuestas (Central, Cauto – Guacanayabo y Guantánamo), estos se dividen a su vez en mesobloques y bloques. El área de estudio pertenece al macrobloque montañoso nororiental.

Estos macrobloques, de acuerdo a sus rasgos estructuro-geomorfológicos, se caracterizan por su gran complejidad y por la existencia de un sistema regional de fallas transverso-digonales de dirección NE, que atraviesa la meseta submarina de Colón (borde meridional jamaicano de la Fosa de Bartlett) y a Cuba oriental. Precisamente, este sistema disyuntivo con 45° aproximadamente (NE-SO a ENE-OSO) respecto al eje geodinámico principal, determina algunos rasgos geomorfológicos y dinámicos de este territorio septentrional caribeño. La zona de sutura de interacción de la Microplaca Cubana y la Placa Caribe, representada por la Fosa profunda de Bartlett, constituye

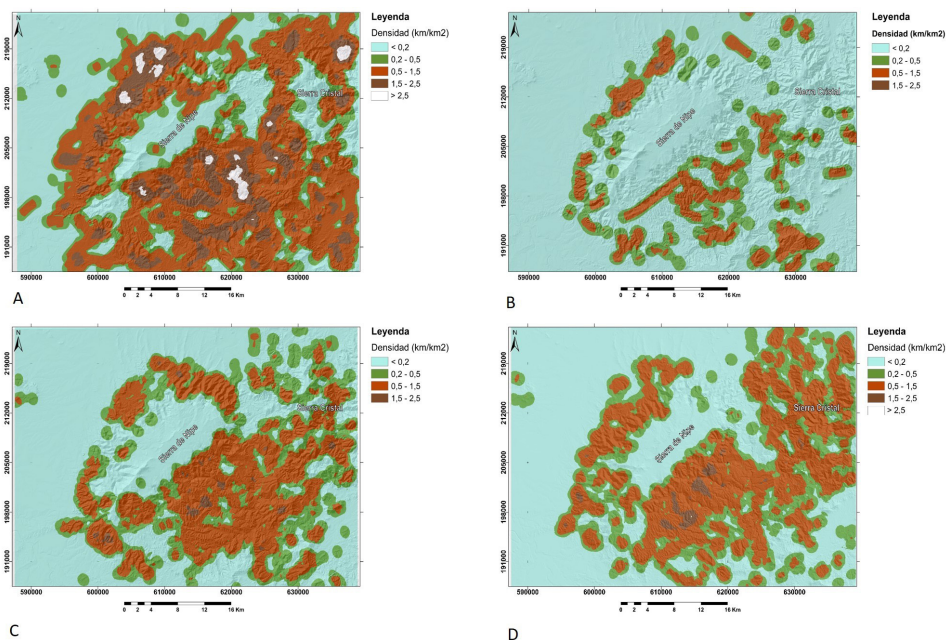


Figura 8 Mapas de densidad de morfolineamientos. A: Mapa de red de drenaje. B: Mapa Estereoscópico. C: Mapa sombreado 135° acimut y D: Mapa sombreado 45° acimut.

el eje geodinámico principal de la endogénesis y de la diferenciación morfoestructural de la corteza terrestre de Cuba oriental (Hernández-Santana *et al.*, 1991a).

En el periodo Plioceno – Cuaternario los macrobloques montañosos sufren una fracturación transverso – diagonal, por medio de los sistemas de fallas orogénicos y neotectónicos tempranos, los cuales determinaron un plano morfoestructural de pequeños bloques en el relieve. Las grandes morfoestructuras longitudinales, ya modificadas, fueron atravesadas por zonas de fallas y de morfoalineamientos de desplazamiento vertical – horizontal, transverso – diagonales y longitudinales en el caso del macrobloque nororiental. Esto es el resultado fundamentalmente, de su carácter heterogéneo, formado por la consolidación de unidades geotectónicas diferentes, genética, cronológica y estructuralmente (Hernández-Santana *et al.*, 1991b; Hernández-Santana *et al.*, 1995). Los morfoalineamientos de los mapas de isobases son los únicos que marcan, entre sus direcciones principales (Figuras 6A, 6B y 6C), las zonas disyuntivas transversales, diagonales y longitudinales, a diferencia del resto de los morfoalineamientos que revelan una preferencia sobre las diagonales NE – SO. Para los morfoalineamientos finales,

se estima una datación relativa en ese periodo Plioceno – Cuaternario. Una vez concluida la orogenia cubana (Eoceno medio), se desarrolla la actividad neotectónica, donde prevalecen hasta la actualidad, según (Furrazola-Bermúdez y Núñez-Cambra, 1997), los desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e ininterrumpidos, que en muchos casos poseen una expresión superficial.

Las direcciones NE – SO (dirección Nipe) y NO – SE de los morfoalineamientos identificados (Figura 6), responden a un sistema de fracturación conjugado que es el resultado del mecanismo geotectónico de desplazamiento lateral de izquierda a lo largo de la zona de sutura Bartlett – Caimán (Hernández-Santana *et al.*, 1995; Cotilla-Rodríguez, 1998). Sin embargo, Núñez-Cambra y otros (2003) consideran que esas orientaciones pueden estar relacionadas con los esfuerzos compresivos que ejerce la placa de Norteamérica por medio de la falla Norte de La Española. Lo anterior permite asegurar que, la alternancia de los periodos compresivos y distensivos en la zona de interacción de placas y el incremento de los movimientos verticales, fueron los que determinaron el desarrollo morfoestructural, contribuyendo a la formación del relieve (Hernández-Santana *et al.*, 1995). La orientación ONO – ESE (Figuras 6A,

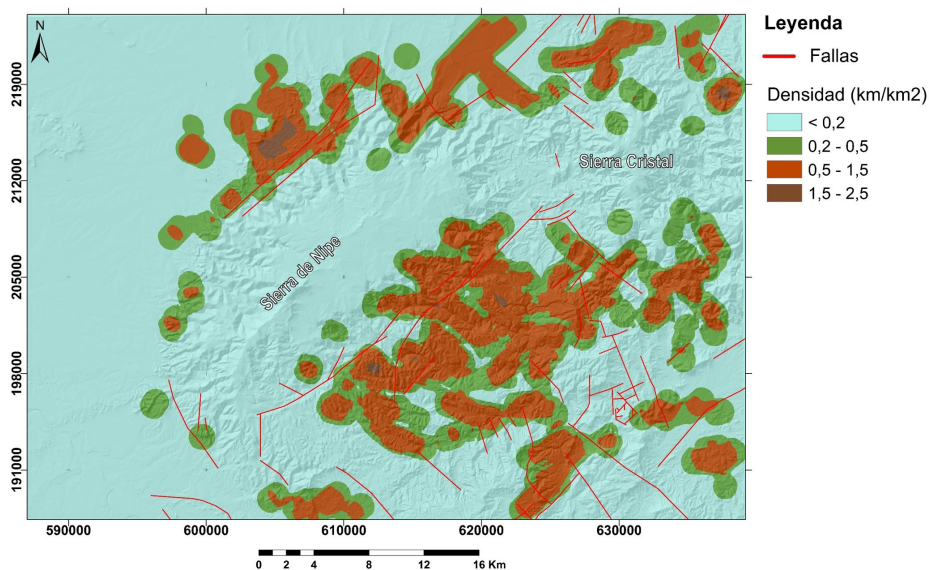


Figura 9 Mapa de densidad de los morfoalineamientos finales del área de estudio con fallas del Mapa geológico 1: 100 000.

6B y 6C) se asocia a un sistema de fallas normales, extendida a lo largo de todo el país conocido como dirección cubana (Nagy *et al.*, 1976).

El rumbo de los morfoalineamientos finales del área de estudio (Figura 6I), corresponden con la dirección Nipe, representada por fallas laterales y normales, que determinan en gran medida la evolución geodinámica del territorio. Esto, constituye una evidencia más de que esta orientación es uno de los principales sistemas de fractura de la región, corroborando varias investigaciones precedentes (Nagy *et al.*, 1976; Hernández-Santana *et al.*, 1991a, 1991b; Hernández-Santana *et al.*, 1995; Furrázola-Bermúdez y Núñez-Cambra, 1997; Cotilla-Rodríguez, 1998, Núñez-Cambra *et al.*, 2003). El mapa final obtenido, es un acercamiento preliminar, a la determinación de fallas con representación superficial. Asimismo, muestra elementos lineales de carácter estructural que afectan al conjunto de bloques morfotectónicos del territorio, caracterizados por Hernández-Santana y otros (1991b), y que son unidades significativas para la delimitación de morfoestructuras y mapeo geomorfológico.

4. Conclusiones

Se obtuvieron 249 morfoalineamientos para el territorio, distribuidos fundamentalmente en las laderas de las Sierras Nipe y Cristal. La longitud total de los morfoalineamientos es de 348.15 km, y el 95 % de estas no superan los 3 km de longitud. Los movimientos neotectónicos diferenciados, ocurridos a través de estructuras falladas determinan un sistema de morfoalineamientos, con una orientación primaria de N 40° – 50° E y una secundaria de N 50° – 60° E, ambas están asociadas a la dirección Nipe, uno de los principales sistemas de fracturación en la región. En la extracción de los morfoalineamientos, los métodos más efectivos, a partir del análisis de su número, longitud, distribución y densidad, son los mapas de sombreados, red de drenaje superficial y el estereoscópico. Los mapas de isobases muestran buena correlación

con las estructuras disyuntivas ya comprobadas, pero dependen significativamente de un sistema de drenaje bien desarrollado. El Mapa final de morfoalineamientos, posee muy buena correlación con la orientación de las fracturas y las estructuras regionales, brinda información útil para el mapeo de las unidades geomorfológicas del área de estudio y, asimismo, ofrece un procedimiento efectivo en la identificación de morfoalineamientos. La génesis del relieve del territorio está fuertemente condicionada por estructuras tectónicas, que han influido directamente en la intensidad de actividad exogenética. Debido a su heterogeneidad geotectónica, la zona de articulación entre las Sierras de Nipe y Cristal, presenta una elevada debilidad tectónica, marcada por elementos lineales preferentemente diagonales, que siguen la orientación de fallas y límites de morfoestructuras presentes.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: YAC y ARZ. *Análisis o adquisición de datos:* SGM. *Desarrollo metodológico/técnico:* SGM; YAC y ARZ. *Redacción del manuscrito original:* SGM. *Redacción del manuscrito corregido y editado:* YAC y ARZ. *Diseño gráfico:* SGM. *Trabajo de campo:* para este trabajo, en esta etapa de investigación, no se realizó trabajo de campo.

Financiamiento

La investigación no contó con ninguna fuente de financiamiento.

Conflictos de intereses

Declaro que los autores de este trabajo no tienen conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Abdullah, A., Akhir, J.M., Abdullah, I., 2010, Automatic mapping of lineaments using

- shaded relief images derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing area, Malaysia: *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 949-958.
- Academia de Ciencias de Cuba (ACC) e Instituto de Geología y Paleontología (IGP), 1988, Mapa Geológico de la República de Cuba escala 1:250 000: La Habana, ACC, 31p.
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., Bachaoui, E.M., 2017, Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas: *Advances in Space Research*, 60, 2355-2367. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.006>
- Ahmadi, H., Pekkan, E., 2021, Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS-A review: *Geosciences*, 11(5), 1-31. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Ahmed, A., El Ammawy, M., Hewaidy, A.G., Moussa, B., Hafz, N.A., 2019, Mapping of lineaments for groundwater assessment in the desert fringes east El-Minia, eastern desert, Egypt: *Environmental Monitoring Assessment*, 191, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7721-8>
- Arlegui, L.E., Soriano, M.A., 1998, Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the Central Ebro Basin (NE Spain): *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3169-3185. <https://doi.org/10.1080/014311698214244>
- Arora, K., Srinu, Y., Gopinadh, D., Chadha, R., Raza, H., Mikhailov, V., Ponomarev, A., Kiseleva, E., Smirnov, V., 2018, Lineaments in Deccan Basalts: The basement connection in the Koyna–Warna RTS región: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 20, 2919-2932. <https://doi.org/10.1785/0120180011>
- Badura, J., Przybylski, B., 2005, Application of digital elevation models to geological and geomorphological studies — some examples: *Przegląd Geologiczny*, 53, 977-983.
- Barea-Pérez, I., Barrera-Veitia, M., Rodríguez-Infante, A., 2010, Estudio morfoestructural del área enmarcada por las concesiones mineras La Delta, Cantarrana y Santa Teresita: *Minería y Geología*, 26, 1-12.
- Cheisa, S., Civelli, G., De Toni, S., 2001, Análisis de fotolineamientos de la República Dominicana: *Revista Geológica de América Central*, 25, 27-47. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i25.8537>
- Chorowicz, J., Breard, J., Guillaude, R., Morasse, C., Prudon, D., Rudant, J., 1991, Dip and strike measured systematically on digitised three-dimensional geological map: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 431-436.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., Bankwitz, P., Álvarez-Gómez, J.L., Franzke, H. J., Rubio-Sauvalle, M.F., Pilarsky, J., 1998, Cinemática neotectónica de Cuba Oriental: *Revista Sociedad Geológica España*, 11, 33-42.
- Cruz-Toledo, R., Pérez-Martínez, Y., Giménez de la Fuente, L., Valdivia-Tabares, C., Pérez-Peña, M.V., Mejías-Rodríguez, L., 2015, Integración de los resultados geológico geomorfológicos con objetivos petroleros en la República de Cuba y precisiones en las provincias de Ciego de Ávila y Sancti Spiritus (resumen), en V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias): La Habana, Sociedad Cubana de Geología.
- Das, S., Pardeshi, S.D., 2018, Comparative analysis of lineaments extracted from Cartosat, SRTM and ASTER DEM: a study based on four watersheds in Konkan region, India: *Spatial Information Research*, 26, 47–57. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0155-x>
- Das, S., Pardeshi, S.D., Kulkarni, P.P., Doke, A., 2018., Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India: *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s12017-018-0155-x>

- org/10.1007/s12517-018-3522-6
- Díaz-Barrios, I.R., 2016, Método para la identificación y cartografía de morfoalineamientos a partir de las imágenes de los modelos digitales del terreno: La Habana, Instituto Técnico Militar José Martí, Tesis doctoral.
- Díaz-Díaz, J.L., Magaz-García, A.R., Portela-Peraza, A.H., Bouza-Alonso, O., Hernández-Santana, J.R., 1990, El relieve de Cuba: Ciencias de la Tierra y el Espacio, 18, 33-44.
- Domínguez-González, L., Rodríguez-Infante, A., Wobbe, F., Stanek, K.P., Gloaguen, R., 2007, Morfoalineamientos en la zona costera entre el poblado de Yamanigüey y la ciudad de Baracoa: Minería y Geología, 23, 1-17.
- Farahbakhsh, E., Chandra, R., Olierook, H. K., Scalzo, R., Clark, C., Reddy, S.M., Müller, R.M., 2020, Computer vision-based framework for extracting tectonic lineaments from optical remote sensing data: International Journal of Remote Sensing, 41, 1760-1787. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2019.1674462>
- Fernández de la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R.M., 2011, Imágenes Landsat TM y modelo digital de elevación para la identificación de lineamientos y mapeo litológico en Punta Mita (México): Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63, 109-118. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2011v63n1a9>
- Furrazola-Bermúdez, G., Núñez-Cambra, K., 1997, Estudios sobre geología de Cuba: La Habana, Centro Nacional de Información Geológica, 528p.
- Gallegos, E., Martínez-Dopico, C.I., Berbeglia, Y., 2008, Mapeo de lineamientos a partir de un DEM (SRTM3): desarrollo y aplicaciones para el estudio de un área de los Andes Patagónicos Septentrionales: Geoacta, 33, 11-22.
- Ganas, A., Pavlides, S., Karastathis, V., 2005, DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates: Geomorphology, 65, 301-319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.006>
- Ghazi-Thannoun, R., 2013, Automatic extraction and geospatial analysis of lineaments and their tectonic significance in some areas of Northern Iraq using remote sensing techniques and GIS: International Journal of Enhanced Research in Science Technology Engineering, 2, 1-11. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20851.99363>
- Han, L., Liu, Z., Ning, Y., Zhao, Z., 2018, Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area: Advances in Space Research, 62, 2480-2493. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.030>
- Hashim, M., Ahmad, S., Amin-Johari, M., Beiranvand-Pour, A., 2013, Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery: Advances in Space Research, 51, 874-890. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.004>
- Hernández-Santana, J.R., Díaz-Díaz, J.L., Magaz García, A., Lilienberg, D.A., 1991a, Evidencias morfoestructura-geodinámicas de desplazamiento lateral siniestro de la zona de sutura interplacas de Bartlett, en Academia de Ciencias de Cuba, Morfotectónica de Cuba Oriental. Capítulo I: La Habana, 5-9.
- Hernández-Santana, J.R., Díaz-Díaz, J.L., Magaz-García, A., González-Ortíz, R., Portela-Peraza, A., Arteaga-Barrios, F., 1991b, Criterios geomorfológicos para la clasificación morfotectónica de Cuba oriental, en Academia de Ciencias de Cuba, Morfotectónica de Cuba Oriental. Capítulo II: La Habana, 10-18.
- Hernández-Santana, J.R., Magaz-García, A., Ortiz-Pérez, M.A., Zamorano-Orozco, J.J., 1995, Clasificación morfoestructural (tipológica) y morfotectónica (regional) del relieve oriental cubano: modelo insular de transición interplaca: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 13-35.

- Hernández-Santana, J.R., Ortíz-Pérez, M.A., Magaz-García, A.R., Díaz-Díaz, J.L., Zamorano-Orozco, J.J., 1994, Estilos geotectónicos bidimensionales y tridimensionales interbloques: una nueva categoría neotectónica para la determinación morfoestructuras montañosas: *Investigaciones Geográficas*, 28, 9-32.
- Hung, L.Q., Batelaan, O., De Smedt, F., 2005, Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam: *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V*, 5983, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1117/12.627699>
- Iturralde-Vinent, M.A., 1998, Sinopsis de la constitución geológica de Cuba: *Acta Geológica Hispánica*, 33, 9-56.
- Jawahar-Raj, N., Prabhakaran, A., Muthukrishnan, A., 2017, Extraction and analysis of geological lineaments of Kolli hills, Tamil Nadu: a study using remote sensing and GIS: *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 195-217. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-017-2966-4>
- Jordan, G., Meijninger, B.M.L., Van-Hinsbergen, D.J.J., Meulenkamp, J.E., Van-Dijk, P.M., 2005, Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 163-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2005.03.003>
- Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L., Arkin, Y., 1996, Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a hough transform: *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 62, 525-531.
- Kim, G.B., Lee, J.Y., Lee, K.K., 2004, Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue™ scripts: *Computers & Geosciences*, 30, 1117-1126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.002>
- Koike, K., Nagano, S., Kawaba, K., 1998, Construction and analysis of interpreted fracture planes through combination of satellite image derived lineaments and digital elevation model data: *Computers & Geosciences*, 24, 573-583. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(98\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(98)00021-1)
- Marghany, M., El Mahdi, S.I., Hashim, M., 2006, Automatic Detection of lineaments from LANDSAT Images in United Arab Emirate (UAE), in *International Conference on Space Technology and Geo-Informatics*, DP08.
- Masoud, A., Koike, K., 2017, Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: Lineament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments: *Computers & Geosciences*, 106, 89-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006>
- Meixner, J., Grimmer, J.C., Becker, A., Schill, E., Kohl, T., 2018, Comparison of different digital elevation models and satellite imagery for lineament analysis: Implications for identification and spatial arrangement of fault zones in crystalline basement rocks of the southern Black Forest (Germany): *Journal of Structural Geology*, 108, 256-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.006>
- Mira-Carrión, A., Veroslavsky, G., Vives, L., Rodríguez, L., 2016, Influencia de los lineamientos estructurales sobre el flujo del Sistema Acuífero Guaraní en la provincia de Corrientes: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 73, 478-492.
- Mogaji, K.A., Aboyeji, O.S., Omosuyi, G.O., 2011, Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote sensing and Geographic Information System (GIS) techniques: *International Journal of Water Resources Environmental Engineering*, 3, 150-160.
- Moreno-Cruz, Y., Ricardo-Labrada, A.,

- Rodríguez-Infante, A., Figueroa-Guerrero, Y., 2017, Metodología para la confección del mapa geomorfológico de la República de Cuba a escala 1:100,000. Guía para su elaboración: La Habana, Instituto de Geología y Paleontología (IGP).
- Mostafa, M., Zakir, F., 1996, New enhancement techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around the Afro-Arabian Shield: *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2923-2943. <https://doi.org/10.1080/01431169608949119>
- Nagal, S., 2014, Mapping of lineaments in Adwa River Basin using remote sensing and GIS techniques: *European Academic Research*, 2, 9646-9658.
- Nagy, E., Brezsnayánszky, K., Brito, A., Coutín-Correa, D.P., Formell-Cortina, F., Franco Álvarez, G.L., Gyarmati, P., Jakus, P., Radocz, G.Y., 1976, Texto explicativo del mapa geológico de la Provincia de Oriente, a escala 1: 250,000. Brigada Cubano-Húngara, 1972-1976: La Habana, Instituto de Geología y Paleontología (IGP), MINBAS, Informe técnico.
- Nkono, C., Liégeois, J.P., Demaiffe, D., 2018, Relationships between structural lineaments and Cenozoic volcanism, Tibesti swell, Saharan metacraton: *Journal of African Earth Sciences*, 145, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.022>
- Núñez-Cambra, K., Castellanos-Abella, E.A., Echevarría-Hernández, B., Llanes-Castro, A.I., 2003, Estructura del área de Merceditas y consideraciones acerca de la procedencia de las ofiolitas del macizo Moa-Baracoa, en Taller de Campo del Proyecto 433 del PICG / UNESCO, Tectónica de Placas en el Caribe: La Habana, 20-27.
- O'Driscoll, E., Campbell, I., 1996, Mineral deposits related to Australian continental ring and rift structures with some terrestrial and planetary analogies: *Global Tectonics and Metallogeny*, 6(2), 83-101. <https://doi.org/10.1127/gtm/6/1996/83>
- Oguchi, T., Aoki, T., Matsuta, N., 2003, Identification of an active fault in the Japanese Alps from DEM-based hill shading: *Computers & Geosciences*, 29, 885-891. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00083-9)
- Ordaz-Hernández, A., Hernández-Santana, J.R., Cofiño-Arada, C.E., Méndez-Linares, A.P., Galaz-Escanilla, G., 2013, Análisis estructural y morfotectónico en los municipios San Cristóbal y Candelaria, Cuba Occidental: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la Falla Pinar: *Investigaciones Geográficas*, 67, 7-23. <https://doi.org/10.14350/rig.36384>
- Onorati, G., Poscolieri M., Ventura, R., Chiarini, V., Crucilla, V., 1992, The Digital Elevation Model of Italy for geomorphology and structural geology: *Catena*, 19(2), 147-178. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(92\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0341-8162(92)90022-4)
- Pain, C.F., 2005, Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales, in Zerger, A., Argent, R. M. (eds.), MODSIM, 2005, International Congress of Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., 1430-1436.
- Paranhos-Filho, A.C., Nummer, A.R., Albrez, E.A., Ribeiro, A. A., Machado, R., 2013, A study of structural lineaments in Pantanal (Brazil) using remote sensing data: *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 85, 913-922. <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652013000300007>
- Paredes, C., Pérez-López, R., Giner-Robles, J.L., de la Vega, R., García-García, A., Gumiel, P., 2006, Distribución espacial y zonificación tectónica de los morfolineamientos en la Isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida): *Geogaceta*, 39, 75-78.
- Pérez-Corona, F.Y., López-Loera, H., Fregoso-Becerra, E., Yutis, V., Martínez-Ruiz, V.J., Dávila-Harris, P., 2017, Caracterización de lineamientos estructurales y sus implicaciones hidrogeológicas en la cuenca de Villa Hidalgo

- (San Luis Potosí) integrando métodos geofísicos potenciales: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), 555-576. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n3a3>
- Pirasteh, S., Pradhan, B., Safari, H. O., Ramli, M.F., 2013, Coupling of DEM and remote-sensing-based approaches for semi-automated detection of regional geostructural features in Zagros mountain, Iran: *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 91-99. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0361-0>
- Portela-Peraza, A.H., Díaz-Díaz, J.L., Hernández-Santana, J.R., Magaz-García, A.R., Blanco, P., 1989, Geomorfología (memoria explicativa del Mapa Geomorfológico de Cuba escala 1:1000,000), en *Nuevo Atlas Nacional de Cuba: La Habana, Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografía y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía*.
- Prabhakaran, A., Jawahar-Raj, N., 2018, Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology: *Geology, Ecology and Landscapes*, 2, 81-103. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452481>
- Prasad, A.D., Jain, K., Gairola, A., 2013, Mapping of lineaments and knowledge base preparation using geomatics techniques for part of the Godavari and Tapi Basins, India: A case study: *International Journal of Computer Applications*, 70, 39-47. <http://dx.doi.org/10.5120/11994-7875>
- Rosabal-Domínguez, S., Rodríguez-Infante, A., Zapata-Balanqué, J.A., 2016, Esquemmatización morfotectónica del sector Guamá, Santiago de Cuba: *Minería y Geología*, 32, 32-46.
- Sánchez-Serrano, F., Gómez-Ortíz, D., Bergamín-de la Viña, J.F., Tejero-López, R., 1996, Identificación de elementos tectónicos del Sistema Central a partir de un modelo digital del terreno: *Geogaceta*, 19, 23-26.
- Sarp, G., Toprak, V., 2007, Spatial analysis of lineaments, north-west of Ankara: 28th Asian Conference on Remote Sensing, ACRS, 3.
- Scheiber, T., Fredin, O., Viola, G., Jarna, A., Gasser, D., Łapińska-Viola, R., 2015, Manual extraction of bedrock lineaments from high-resolution LiDAR data: methodological bias and human perception: *G.F.F.*, 137(4), 362-372. <http://dx.doi.org/10.1080/11035897.2015.1085434>
- Sedrette, S., Rebai, N., 2016, Automatic extraction of lineaments from Landsat Etm+ images and their structural interpretation: Case study in Nefza region (North West of Tunisia): *Journal of Research in Environmental*, 4, 139-145.
- Suzen, M., Toprak, V., 1998, Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey: *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1101-1114. <https://doi.org/10.1080/014311698215621>
- Tapia-Varela, G., López-Blanco, J., 2002, Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 50-65.
- Trallit, D.M., Blom, R.G., Zlotnicki, V., Donnellan, A., Evans, D.L., 2005, Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards, *ISPRS: Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.002>
- Ukpai, S.N., Okogbue, C.O., Oha, I.A., 2020, Investigation of hydrologic influence of geologic lineaments in areas of the Lower Benue Trough, Southeastern Nigeria: *Journal of Earth System Science*, 129, 1-18. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-019-1283-6>
- Wladis, D., 1999, Automatic lineament detection using digital elevation models with second derivative filters: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, 453-458.
- Woodall, R., 1993, The multidisciplinary team approach to successful mineral exploration: *Society of Economic Geologists Newsletter*, 14, 6-1. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1993-14.fea>