



## Cartografía de los depósitos cuaternarios a partir de datos de pozos en el NNW de la Cordillera de Guaniguanico, Cuba

### *Quaternary deposits mapping using drillhole data in the NNW of the Cordillera de Guaniguanico, Cuba*

Benítez Frómata, Pedro de Jesús<sup>1\*</sup>; Estévez Cruz, Elmidio<sup>2</sup>; Peñalver, Leandro L.<sup>1</sup>

(1) Instituto de Geología y Paleontología. Servicio de Geológico de Cuba. Calle Vía Blanca No. 1002. CP 11000. La Habana, Cuba. \*Autor principal: pbenitezfrometa@gmail.com

(2) Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Calle Martí # 300. CP: 20100 Pinar del Río. Cuba

#### Resumen

En la actualidad resulta imperativo el estudio de los depósitos superficiales ya sea para fines económicos, ambientales o científicos. La presente investigación tiene como objetivo actualizar el mapa de depósitos cuaternarios de la parte NNW de la Cordillera de Guaniguanico a partir de datos de pozos de investigaciones geológicas regionales, para lo cual se realizó la interpretación compleja de la documentación de los sondeos. La metodología empleada consta de las siguientes etapas: revisión bibliográfica, análisis de la base de datos de los registros de pozos, procesamiento del modelo digital del terreno (MDT), interpretación de los mapas regionales (suelos y espectrometría gamma), y la cartografía de los depósitos recientes. El MDT fue procesado para derivar los mapas de pendientes y de formas del relieve, los cuales juntos con el mapa disponible de depósitos cuaternarios, el mapa de suelos, el mapa de radioelementos y un profundo análisis de las condiciones geomorfológicas y litológicas, permitió determinar los tipos de sedimentos presentes en el área. Los espesores calculados en los pozos que atraviesan los depósitos superficiales fueron interpolados mediante el método geoestadístico *Kriging* Ordinario para construir el mapa de isópacas. El trabajo demostró la utilidad del procesamiento y análisis de los pozos de investigaciones geológicas regionales para actualizar los mapas de depósitos cuaternarios y revelar el patrón de distribución de sus espesores. A través del estudio se pudo identificar los siguientes tipos de depósitos: aluviales, eluvio-coluvio-proluviales, marinos, palustres y depósitos terrígenos constituidos por la Fm. Guane y un conjunto no diferenciable de las formaciones Guane más Guevara. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por ejemplo para la prospección y exploración de yacimientos minerales, la búsqueda de nuevas zonas para la perforación de pozos hidrológicos o estudios para la preservación del medio ambiente.

**Palabras clave:** depósitos cuaternarios, regolita, Cordillera de Guaniguanico, cartografía de depósitos superficiales, mapa de isópaca.



## Abstract

Currently, it is imperative to study surface deposits, whether for economic, environmental or scientific purposes. This research aims at updating the map of quaternary deposits based on data from regional geological research drillholes, for which the complex interpretation of the drillholes logging was carried out. The methodology used consists of the following stages: literature review, analysis of the drillholes logging database, DTM processing, interpretation of regional maps (soils and gamma- spectrometry) and mapping of recent deposits. The digital elevation model was processed to derive the slope and landform maps, which together with the available map of Quaternary deposits, the soil map, the radioelement map and an in-depth analysis of the geomorphological and lithological conditions, allowed to determine the types of sediments present in the area. The thicknesses calculated in the drillholes that intercept the surface deposits were interpolated using the geostatistical method "Ordinary Kriging" to build the isopach map. The work demonstrated the usefulness of the processing and analysis of regional geological investigation drillholes to update Quaternary deposit maps and reveal the distribution pattern of its thicknesses. The study allowed to identify the following types of deposits: alluvial, eluvium-coluvium-proluvial, marine, marshy and terrigenous deposits formed by the Fm. Guane and a non-differentiable unit of the Guane and Guevara formations. The results obtained can be used for the prospecting and exploration of mineral deposits, the search for new areas for the drilling of hydrological wells and environmental studies.

**Key words:** quaternary deposit, regolith, Cordillera de Guaniguanico, superficial deposit mapping, isopach map.

## 1. Introducción.

La cartografía de los depósitos cuaternarios, así como el estudio de su génesis y de las regularidades de su localización revisten gran importancia científica y aplicada. En este sentido, estos depósitos pueden tener potencialidades mineralogénicas y hospedar importantes recursos metálicos e industriales. Por otra parte, en las zonas de clima tropical cubiertas por regolitas se dificulta considerablemente los trabajos de prospección y exploración. Por esta razón conocer los rasgos principales de las regolitas (distribución, espesor, génesis) resulta esencial para desarrollar programas efectivos de prospección geoquímica y geofísica y seleccionar el mejor método de investigación, el medio a muestrear, así como el espaciamiento del muestreo (Cornelius *et al.*, 2001; Cohen *et al.*, 2010).

También los mapas integrados de regolitas con formas del relieve han ganado importancia y uso en la exploración mineral en los últimos años (Anand, 2001; Anand y Butt, 2010; Gonzalez-Alvarez *et al.*, 2016; Salama *et al.*,

2016). Estos aportan dos elementos claves de información para los geólogos prospectores, por una parte, criterios sobre si los sedimentos superficiales están *in situ* (residuales) o han sido transportados y por otro el espesor de estos depósitos. Estas cuestiones son importantes para la revelación e interpretación de las anomalías de dispersión geoquímica. Por otra parte, las regolitas, específicamente las lateritas residuales y las ferricretas han demostrado ser útiles como medio de muestreo geoquímico para las investigaciones geológicas regionales y locales para oro, metales básicos y metales raros (Cornelius *et al.*, 2001).

La regolita, entendido en su concepto más general como el material superficial de diferente origen que cubre la roca fresca o roca madre (Hocking *et al.*, 2001), es un testigo inequívoco de las condiciones del clima, la relación entre la paleogeografía, el paleorelieve y la geología (Cohen *et al.*, 2010). Para la cartografía de la superficie es un componente crucial debido a su correspondencia con las formas del terreno (Bolster, 1999; Butt *et al.*, 2000; Anand y Paine, 2002; Brown y Hill,

2004).

La exploración de minerales a través de las formaciones superficiales se está convirtiendo en uno de los retos fundamentales para la industria. A lo largo del mundo se realizan investigaciones para reconsiderar áreas que antes eran desfavorables para la exploración, enfocándose en el estudio de zonas superficiales, esto debido a que cerca del 25% de la superficie continental está afectado por condiciones climáticas tropicales que resultan en una intensa lixiviación química. La compresión de los procesos de meteorización, erosión y desgaste que forman estas gruesas cubiertas transportadas requieren un enfoque de estudio diferente al que se aplica en áreas con una menor actividad de estos parámetros. De ahí la importancia de determinar los espesores de estas zonas superficiales, que en su mayoría coinciden con depósitos cuaternarios.

Para la cartografía de los depósitos cuaternarios y la cuantificación de sus espesores se utilizan diferentes métodos y técnicas como el procesamiento de imágenes satelitales y fotos aéreas, métodos geofísicos y trabajos de campo (Pedrera *et al.*, 2007; Bottelin *et al.*, 2019). También se emplean grandes bases de datos de sondeos, combinados con datos aeromagnéticos de alta resolución para construir modelos 3D de regolitas (Smith *et al.*, 2000). Para estimar los espesores de los depósitos superficiales a partir de datos puntuales se han usado métodos de interpolación espacial como el método del Vecino Natural (Lawley y García-Bajo, 2010) y el *Kriging* Ordinario (Malvić y Jović, 2012; García *et al.*, 2012; Malvić y Jović, 2012). En Cuba los espesores de todas las formaciones y depósitos cuaternarios se han estimado a partir de los trabajos de exploración y perforación llevados a cabo en la década de los 80 (Pérez, 2018). Estas estimaciones se hicieron a partir de los testigos de perforación, y nunca se ha realizado una homogenización de la información, por lo que resulta muy difícil conocer el espesor de una zona en particular.

La Cordillera de Guaniguanico (Fig. 1) se loca-

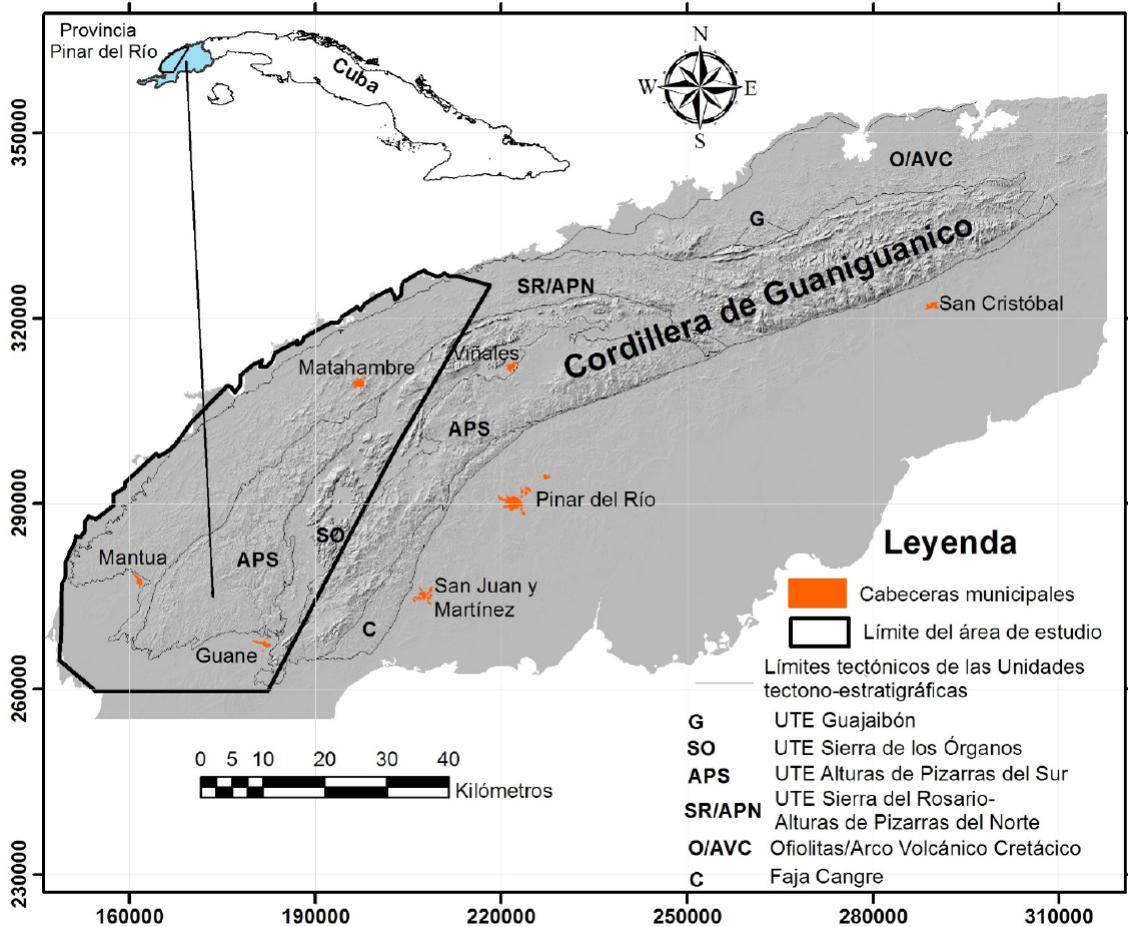
liza en el extremo occidental de Cuba y ha sido objeto de importantes investigaciones geológicas, incluyendo la cartografía geológica a escala 1:50 000 y la búsqueda acompañante de minerales sólidos (Astajov *et al.*, 1982; Burrov *et al.*, 1987; Martínez *et al.*, 1988) lo que ha permitido entender su estructura geológica y evaluar sus potencialidades metalogénicas. Sin embargo, los depósitos cuaternarios (formaciones y depósitos innominados), que están representados por una secuencia carbonático-terrágena (Peñalver *et al.*, 2021) no han sido estudiados con el mismo grado de detalle, y solo se cuenta con un mapa a pequeña escala 1: 250 000.

En el sector se han descrito los depósitos terrígenos, provenientes de la Fm. Guane con edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. También se han cartografiado depósitos holocénicos innominados, como los aluviales, palustres y marinos que poseen una gran distribución superficial. Los de mayor extensión son los depósitos eluvio-coluvio-proluviales, siendo estos los que se desarrollan sobre la roca meteorizada, formando los grandes mantos de meteorización (regolitas), aunque sus áreas de afloramiento no han sido bien delimitadas en los mapas geológicos disponibles.

El presente trabajo está dirigido a actualizar el mapa de depósitos cuaternarios del NNW de la Cordillera de Guaniguanico (Fig.1), revelar el patrón espacial de distribución de los sedimentos superficiales e identificar las regularidades de sus espesores, a partir de datos de pozos de investigaciones geológicas regionales.

## 2. Contexto geológico del área de estudio

El área de estudio, que ocupa una superficie de 2341 km<sup>2</sup>, se encuentra ubicada en la provincia de Pinar del Río, al NW de la Cordillera de Guaniguanico, y se extiende por los municipios de Matahambre, Guane, Viñales, San Juan y Martínez y Mantua (Fig. 1).



**Figura 1.** Mapa de relieve de sombras del extremo occidental de Cuba, mostrando la situación físico-geográfica del área de estudio y las unidades tectono-estratigráficas de la Cordillera de Guaniguanico.

**Figure 1.** Shaded relief of the westernmost part of Cuba, showing the physical-geographical situation of the study area and the tectono-stratigraphic units of the Guaniguanico Cordillera.

La Cordillera de Guaniguanico es un terreno tectono-estratigráfico (Iturralde-Vinent, 1996; Pszczolkowski, 1999) cuyas rocas proceden del paleomargen mesozoico de América del Norte (Iturralde-Vinent, 1994, 1998; Cobiella-Reguera, 2008). En la cordillera se desarrolla una tectónica de mantos de cabalgamiento (Hatten, 1957; Rigassi-Studer, 1963; Piotrowska, 1978; Martínez y Vázquez, 1987; Martínez *et al.*, 1991) cuyas profundidades superan los 5 km (Cobiella-Reguera, 2008) y que son consecuencia de la colisión entre el Paleomargen Pasivo de América del Norte y el Arco Volcánico Cretácico durante el Eoceno temprano. En la cordillera se reconocen cinco unidades

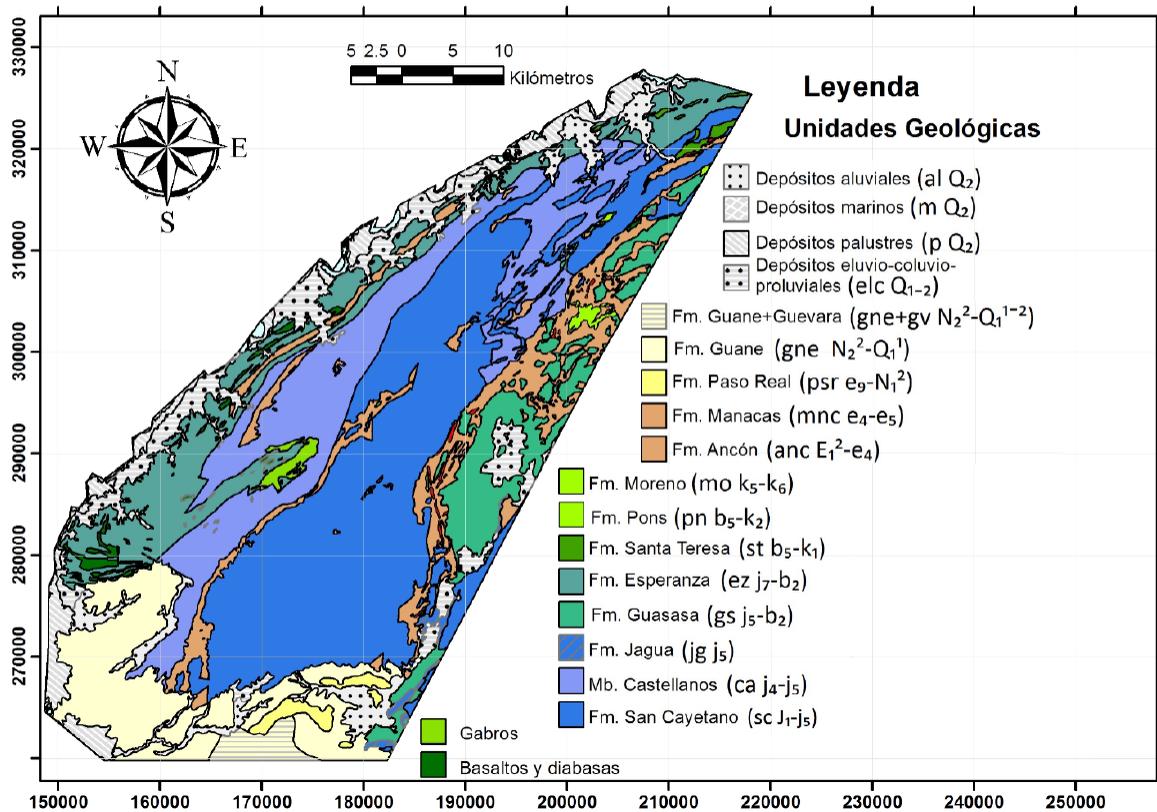
tectónicas: a) cabalgamientos de Sierra de los Órganos (SO), b) Alturas de Pizarras del Sur (APS), c) Cinturón Cangre, d) cabalgamientos de Sierra del Rosario/ Alturas de Pizarras del Norte/ Esperanza (SR/APN/E), y e) Pan de Guajaibón (Pszczolkowski, 1978; Somin y Millán, 1981; Ponce *et al.*, 1985; Pszczolkowski, 1999; Cobiella-Reguera, 2000) (Fig. 1).

La compleja estructura tectónica, el apilamiento en mantos y las características litoestructurales de la cordillera condicionan los rasgos principales del relieve. El mismo está formado por cadenas paralelas de montañas y alturas de orientación SW-NE, separadas por depresiones y valles intramontanos (Díaz

et al., 1989). En la Sierra de los Órganos, predomina el relieve kárstico de mogotes, sierras calcáreas y poljes marginales o de contacto, mientras que, en las Alturas de Pizarras, se destacan como formas orográficas las colinas y las alturas (Díaz-Guanche, 2017) (Fig. 1).

La secuencia del paleomargen, expuesta en la cordillera, está constituida por tres paquetes rocosos bien diferenciados que abarcan desde el Jurásico Inferior hasta el Eoceno: uno siliciclástico en la base, sobreyacido por un paquete carbonatado, y terminando con otro siliciclástico de carácter olistostrómico. También asociadas a las zonas de fallas o como grandes bloques en la secuencia olistostrómica se describen rocas magmáticas de composición máfica y ultramáfica.

Según Cobiella-Reguera (2008) el corte estratigráfico de estas unidades en su parte inferior está compuesto por rocas jurásicas, pre-Oxfordiano Superior de carácter turbidítico, acumuladas en ambientes fluviales y deltaicos (Fm. San Cayetano y su Mb. Castellano –areniscas cuarzo-feldespáticas, limolitas y lutitas con un metamorfismo muy incipiente que les da aspecto pizarroso), estas rocas transicionan hacia calizas micríticas finamente estratificadas intercaladas con lutitas laminares (Fm. Jagua). El segundo paquete comienza con un potente banco carbonatado (Fm. Guasasa) sobre el cual yace concordante una sección carbonatada de aguas profundas, bien estratificada, rica en materia orgánica del Tithoniano-Campaniano, con algunos niveles de silicitas (formaciones Pons y Moreno). Los cortes del paleomargen terminan con



**Figura 2.** Mapa geológico del área de estudio. Nótese la orientación de la estructura geológica en dirección NE-SW, y el predominio de las secuencias jurásicas (Fm. San Cayetano y el Mb. Castellano).

**Figure 2.** Geological map de study area. Note the NE-SW orientation of the geological structure, and the predominance of Jurassic sequences (San Cayetano Fm. and the Castellano Mb.).

Sistema	Serie	Unidad y Símbolo	Columna	
Cuaternario	Holoceno	Depósitos aluviales (al)		
		Depósitos marinos (m)		
		Depósitos palustres (p)		
	Pleistoceno Superior	Temp. Tardío		Depósitos eluvio-coluvio-proluviales (elc)
Pleistoceno Inferior	Fm Guane + Guevara (gne+gv)			
	Neógeno	Plioceno Superior	Fm Guane (gne)	

**Figura 3.** Esquema geocronológico del Cuaternario propuesto por el Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC). Modificado de Peñalver *et al.* (2021).

**Figure 3.** Quaternary geochronological scheme proposed by the Cuban Geological Service (IGP-SGC). Modified from Peñalver *et al.* (2021).

las calizas paleocénicas de la Fm. Ancón. Por encima, y concordantemente, yacen los depósitos sinorogénicos, clásticos, mayormente caóticos, de la Fm. Manacas, acumulados en una cuenca de antepaís, vinculados al emplazamiento de los cabalgamientos de la Cordillera de Guaniguanico entre finales del Paleoceno e inicios del Eoceno Temprano (Fig. 2).

Los depósitos recientes de esta región están representados por un corte carbonático-terrágeno (Fig. 2 y Fig. 3), estos incluyen unidades litoestratigráficas del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, los depósitos cuaternarios eluvio-coluvio-proluviales, así como los depósitos innominados del Holoceno.

**Fm. Guane (gne).** Según datos de perforaciones de los levantamientos geológicos regionales (Astajov *et al.*, 1982; Burov *et al.*, 1987; Martínez *et al.*, 1988) puede alcanzar hasta 50 m y de acuerdo a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Plioceno Superior- Pleistoceno Inferior. Esta formación está constituida por conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas, débilmente cementados por arcillas. Estas rocas presentan una estratificación indefinida, lenticular y más raramente cruzada. Su composición es oligomíctica, con predominio de las rocas silíceas. Esta formación se depositó en un mar con abundante aporte aluvial, pudiendo llegar a ser estuarino.

**Fm Guevara (gv).** Está compuesta por arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas, gravas finas, fragmentos de ferricretas y cantos rodados. La composición es oligomíctica, con predominio de las rocas silíceas. Presenta alto contenido de pisolitas y nódulos ferríticos. La estratificación es horizontal no clara, paralela. Sus autores (Kartashov *et al.*, 1981), basándose en las particularidades litológicas de estos depósitos, el carácter de su yacencia (capas poco potentes e isométricas), su estrecha relación con llanuras costeras y el relieve aplanado de su superficie, la catalogaron como relictos de llanuras marinas.

### **Depósitos eluvio-coluvio-proluviales (elc).**

Estos depósitos comprenden las cortezas de meteorización desarrolladas *in situ*, que se originan a expensas de su propio material y que se asocian comúnmente con depósitos eluviales así como el material friable desplazado ladera abajo por gravedad (depósitos proluviales). También se incluyen en esta categoría a los depósitos coluviales que se originan por el desprendimiento de grandes bloques, los que se acumulan en el piedemonte de las elevaciones, y que no necesariamente tienen que asociarse con alteración superficial. Por esta razón, este es un grupo de depósitos complejos que varían sensiblemente su litología, desde arcillas, limos y arenas, hasta bloques de calizas, granodioritas, tobas (Peñalver *et al.*, 2001).

### **Depósitos palustres (p).**

Estos depósitos se forman en dos ambientes esencialmente diferentes y por tal motivo se pueden distinguir dos facies: los pantanos de mangles y los pantanos costeros de agua dulce (Peñalver *et al.*, 2001). Los pantanos de mangle se originan en el mar y su desarrollo representa un crecimiento de la tierra a expensas del mar. En los límites de los pantanos de mangles que bordean la costa, la línea costera sólo se puede trazar condicionalmente (Peñalver *et al.*, 2001). Estos depósitos están compuestos tanto por facies terrígenas (arcillas de color gris oscuro y pardo oscuro) como carbonatadas (limos finos carbonatado-organógenos con una cantidad variable de detrito vegetal).

Los pantanos costeros de agua dulce se originan en la tierra, en las zonas de descarga de las aguas subterráneas, fundamentalmente kársticas, como resultado de la contención de esta agua por el mar. El desarrollo de estos pantanos no cambia el límite entre la tierra y el mar y la línea costera, en las regiones donde se desarrolla, posee una configuración bien marcada (Peñalver *et al.*, 2021). Los pantanos costeros de agua dulce prácticamente no reciben material terrígeno y sus depósitos están representados, fundamentalmente, por residuos vegetales y limos carbonatados.

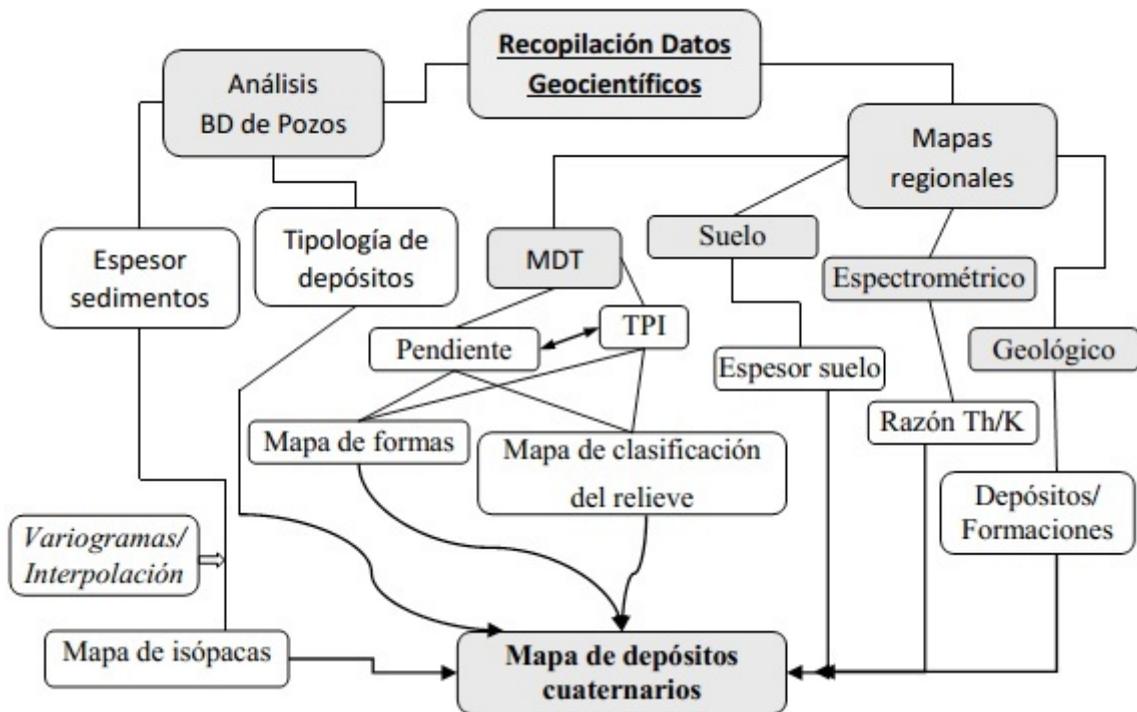
**Depósitos aluviales (al).** Los depósitos aluviales holocénicos están constituidos fundamentalmente por limos gris parduscos, limos arenosos y arcillas, con raras intercalaciones de gravas y guijarros pequeños (Peñalver *et al.*, 2001). La composición indica una relación directa con sus fuentes de alimentación. En las regiones donde el manto de meteorización caolinítico estaba destruido o donde no se desarrolló, los depósitos aluviales se caracterizan por una composición polimíctica. Su material clástico está representado por cuarzo, feldespato, hornblendas, piroxenos y fragmentos líticos de rocas carbonatadas y efusivas, serpentinitas y otras rocas locales (Peñalver *et al.*, 2001).

**Depósitos marinos (m).** Están representados principalmente por arenas y guijarros, acumulados en playas y camellones de tormentas, a veces cementados por carbonato, formando rocas de playa (*beach rock*) (Peñalver *et al.*, 2020).

### 3. Materiales y Métodos

La metodología utilizada para el estudio del patrón espacial de distribución de los sedimentos recientes y las regularidades de sus espesores, a partir de datos de pozos se muestra en la Figura 4. Esta consta de 4 etapas fundamentales: Revisión bibliográfica, análisis de la base de datos de los registros de pozos, procesamiento del MDT y generación de los mapas morfométricos y de formas del relieve, interpretación de los mapas regionales de suelos y aerospectrometría gamma y la cartografía de los depósitos recientes.

La revisión bibliográfica abordó las principales metodologías empleadas en el estudio y cartografía de las regolitas y los sedimentos recientes. La investigación documental incluyó: la revisión y recopilación bibliográfica, los antecedentes de investigaciones anteriores y la captura de información.



**Figura 4.** Diagrama de flujo de la investigación, describiendo las etapas del procesamiento y los datos geocientíficos procesados.

**Figure 4.** Research flowchart, describing the processing stages and the geoscientific data processed.

Los pozos utilizados en el estudio pertenecen a la base de datos del Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC), la cual recoge todas las perforaciones realizadas durante los levantamientos geológicos regionales de los años 80 (Astajov *et al.*, 1982; Martínez *et al.*, 1988; Burov *et al.*, 1987).

La base de datos es accesible a través de dicha institución. Cada registro de pozo consta de los siguientes campos: identificador del pozo, desde, hasta, descripción litológica, coordenadas rectangulares de la boca del pozo, etc.

Se analizaron alrededor de 4500 pozos, con una distribución espacial bastante uniforme y una distancia media entre pozos de 400 m. De acuerdo a las descripciones litológicas un total de 1149 pozos interceptan los depósitos o formaciones cuaternarias. El corte geológico atravesado por cada perforación fue minuciosamente estudiado prestandose la máxima atención a los primeros metros perforados, desde la superficie hasta el inicio de la roca fresca. El intervalo identificado fue reclasificado atendiendo a su composición en: depósitos eluvio-coluvio-proluviales, depósitos marinos, depósitos palustres, depósitos aluviales

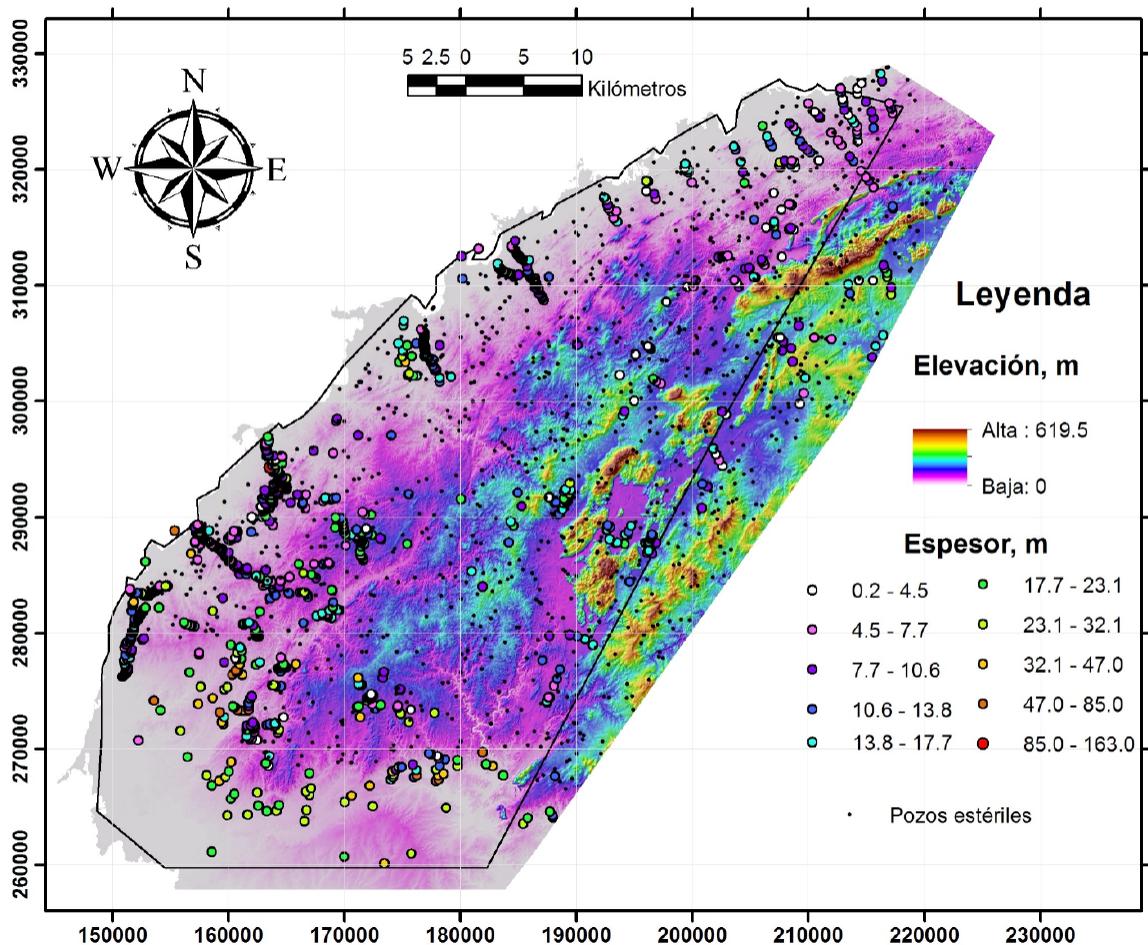


Figura 5. Red de pozos de los levantamientos geológicos regionales con los espesores interceptados de los depósitos superficiales, visualizado sobre el modelo digital de elevación.

Figure 5. Drillhole grid from regional geological surveys with the intercepted thicknesses of superficial deposits, visualized on the digital elevation model.

y depósitos terrígenos. Además, en cada uno de los pozos se determinó el espesor de regolita, a partir de la diferencia entre la cota de la boca del pozo y el tope de la roca fresca (Fig. 5). Considerando los datos obtenidos de la interpretación de las columnas de los pozos se elaboran los mapas regionales, donde se muestra la distribución de los depósitos recientes, así como los espesores alcanzados (mapa de isópacas).

El MDT con resolución espacial de 25 m, construido por el Grupo Empresarial GeoCUBA, fue procesado para determinar la relación entre las formas del relieve y la distribución espacial de los mantos de meteorización. En este sentido del MDT se derivaron los mapas de pendiente, modelo de sombra, así como mapas basados en el índice de posición topográfica (TPI- *topographic position index*).

Los sedimentos recientes se pueden clasificar atendiendo a su posición topográfica en el relieve en eluvio (cimas), aluvios (valles) y coluvios (bases de laderas) (Merrill, 1897/1906; Williams *et al.*, 1982; Powell, 1988; Arbogast y Johnson, 1994; Nemec y Kazanci, 1999; Heckrath *et al.*, 2005). Por esta razón, se construyeron mapas basados en el índice de posición topográfica (Weiss, 2001). Este índice que no es más que la diferencia entre la elevación de una celda del MDT y la media de las elevaciones de las celdas vecinas, dentro de una determinada vecindad espacial o radio (250 m en este caso), permite clasificar el relieve en clases morfológicas (Weiss, 2001; Skentos, 2018). En este sentido, atendiendo a los valores normalizados del TPI y el ángulo de la pendiente el relieve fue clasificado en 4 categorías morfológicas o de posición de las vertientes: zonas llanas ( $-1 \leq \text{TPI} \leq 1$  y la pendiente  $< 6^\circ$ ), laderas ( $-1 \leq \text{TPI} < 1$  y la pendiente  $> 6^\circ$ ), valles

**Tabla 1.** Clasificación de las formas del relieve basada en la combinación de índices de posición topográfica a diferentes escalas, vecindades de  $R_1=100$  m y  $R_2=300$  m. Modificado de Weiss (2001).

**Table 1.** Landform classification based on combined topographic position indexes at different scales, neighborhoods of  $R_1=100$  m and  $R_2=300$  m. Modified from Weiss (2001).

Clases de formas del relieve	Descripción*
Valles fluviales encajados	Vec 1: $\text{TPI} \leq -1$ Vec2: $\text{TPI} \leq -1$
Valles someros, poco diseccionados	Vec 1: $\text{TPI} \leq -1$ Vec2: $-1 < \text{TPI} < 1$
Drenajes en las cabeceras	Vec 1 $\text{TPI} \leq -1$ Vec2 $\text{TPI} \geq 1$
Valles en forma de U	Vec 1: $-1 < \text{TPI} < 1$ Vec2: $\text{TPI} \leq -1$
Zonas llanas	Vec 1: $-1 < \text{TPI} < 1$ Vec2: $-1 < \text{TPI} < 1$ , pendiente $\leq 6^\circ$
Zonas de pendientes suaves	Vec 1 $> -1 < \text{TPI} < 1$ Vec2: $-1 < \text{TPI} < 1$ , pendiente $> 6^\circ$
Zonas de pendientes pronunciadas	Vec 1 $> -1 < \text{TPI} < 1$ Vec2 1 $\text{TPI} \geq 1$
Sierras locales	Vec 1 $\text{TPI} \geq 1$ Vec2 $\text{TPI} \leq -1$
Sierras de pendientes medias	Vec 1 $\text{TPI} \geq 1$ Vec2 $-1 < \text{TPI} < 1$
Cimas	Vec 1 $\text{TPI} \geq 1$ Vec2 $\text{TPI} \geq 1$

\*Vec-Vecindad

(TPI < -1) y cimas (TPI > 1). Considerando esta clasificación se puede inferir si los sedimentos están “in situ” (cimas) o fueron transportados (laderas y sus bases), facilitando su clasificación de acuerdo a su génesis.

Por otra parte, combinando los valores del TPI a diferentes escalas o vecindades alrededor de la celda del MDT es posible discriminar diversas formas del relieve (Tabla 1). En este caso se usaron los mapas de TPI con vecindades de 100 y 300 m, combinados con el mapa de pendiente para clasificar las formas del relieve en 10 clases, siguiendo los criterios propuestos por Weiss (2001).

Otros mapas regionales fueron procesados e interpretados para precisar las áreas de afloramiento de los depósitos recientes. En el estudio se incluyeron el mapa de suelos a escala 1: 25 000 (MINAG, 2002), mapas de espectrometría gamma aérea (U, Th y K) a escala 1:50 000 (Mondelo y Sánchez, 2011) y el mapa de depósitos cuaternarios a escala 1: 250 000 (Peñalver *et al.*, 2020).

El suelo es un producto importante de la meteorización y, por lo tanto, su génesis está intrínsecamente relacionada con los procesos y productos de la meteorización. Por esta razón, se utilizó el mapa homónimo de la provincia de Pinar del Río (Departamento de suelo, Ministerio de la Agricultura) para estudiar los espesores del horizonte edafológico, partiendo del criterio que este parámetro refleja, en cierta medida, los espesores de sedimentos sobre la roca fresca. El procesamiento de este mapa se limitó a la reclasificación atendiendo al espesor del suelo, almacenado en la tabla de atributos.

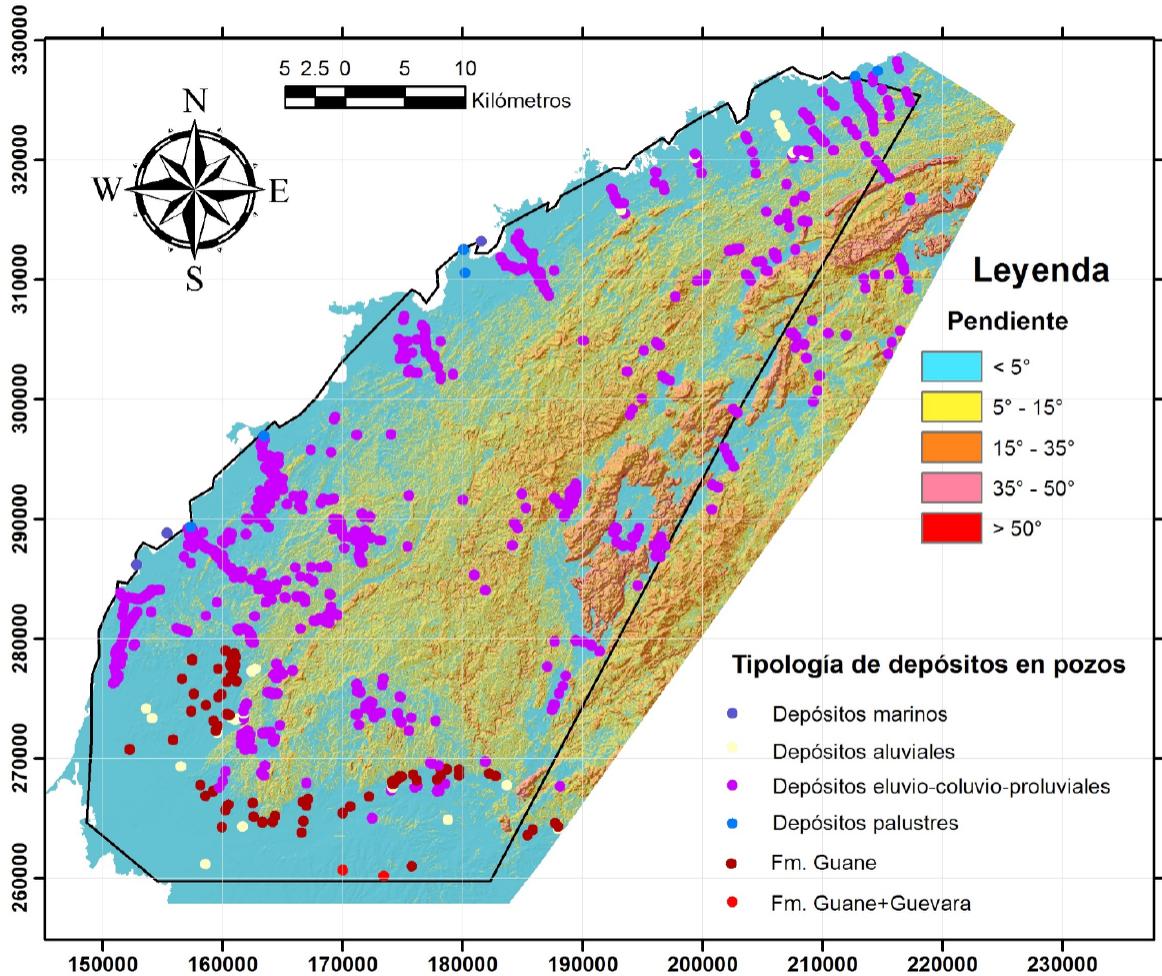
La meteorización modifica la concentración y distribución de los radioelementos (U, Th, K) en relación con la roca fresca. Por lo tanto, el método de espectrometría gamma puede proporcionar información sobre los procesos geomórficos, las propiedades del suelo/regolita (Wilford *et al.*, 1997) y distinguir entre áreas de meteorización activa y erosión en contraposición a la acumulación de sedimen-

tos. En los últimos tiempos el método ha sido empleado, combinado con otras bases de datos en la cartografía de suelos y regolitas (Nicolet y Erdi-Krausz, 2003; Wilford, 2012). En este estudio se utilizaron los mapas de concentraciones de radioelementos U (ppm), Th (ppm) y K (%) del levantamiento gamma aéreo y magnético del IGP-SGC, que fueron compilados y sistematizados por Mondelo y Sánchez (2011). En esta investigación se calcularon las relaciones o razones K/U, Th/U, Th/K para evaluar su capacidad de delimitar áreas donde afloran los depósitos recientes y por tanto facilitar su cartografía.

El mapa de los depósitos cuaternarios (Peñalver *et al.*, 2020) constituyó la base cartográfica inicial para este estudio. Este mapa refleja el grado de conocimiento sobre los depósitos recientes en lo referido a: tipología de depósitos y su distribución espacial. También se utilizó el mapa geológico digital a escala 1:100 000 del Servicio Geológico Nacional (García-Delgado *et al.*, 2005) para caracterizar el marco geológico y tectónico regional, así como la distribución de las formaciones cuaternarias.

En la siguiente etapa se recurrió a la variografía para caracterizar la continuidad espacial de los espesores de los sedimentos, se estimaron variogramas direccionales y se ajustó un modelo matemático que describe la variabilidad espacial revelada. Los resultados fueron comparados con los rasgos geomórficos del relieve para entender los controles de su distribución. Posteriormente, estos modelos fueron utilizados para interpolar por métodos geoestadísticos (*Kriging* Ordinario) los espesores y de esta forma construir los mapas de isópacas.

Finalmente, con los resultados de la interpretación compleja de los datos de pozos, las formas del relieve derivadas del MDT y el TPI, así como la superposición de los mapas regionales de suelo y espectrometría gamma, se confecciona el mapa de depósitos cuaternarios donde se indica: la distribución espacial de los tipos genéticos, su espesor y su relación con el relieve del área.



**Figura 6.** Mapa de pendiente sobre un modelo digital de elevación que muestra los principales rasgos geomórficos del área de estudio. Nótese la tipología de los depósitos interceptados por los pozos.

**Figure 6.** Slope map draped over a digital elevation model showing the main geomorphic features of the study area. Note the typology of the deposits intercepted by the wells.

#### 4. Análisis de los resultados

##### 4.1. Procesamiento del MDT

El análisis de MDT (Fig. 5) y el mapa de pendiente derivado de este (Fig. 6), muestra que gran parte del área está dominada por terrenos de alturas medias con inclinaciones de ligeras a fuerte entre 2°-15° (Demek, 1972), característica que favorece la acumulación de depósitos ya sean de génesis aluvial o eluvio-coluvio-proluvial. El 80 % de los pozos que

registran sedimentos se ubican en áreas con pendientes inferiores a 5°.

##### 4.2. Análisis de los espesores de los sedimentos

Los espesores de los depósitos recientes, estimados a partir de los intervalos atravesados por los pozos, muestran una distribución asimétrica positiva con predominio de valores bajos y una cantidad limitada de valores extremos (Fig. 7). Los valores más característi-

**Tabla 2.** Distribución de los pozos y los espesores de sedimentos de acuerdo a las clases de posición de las pendientes.**Table 2.** Distribution of drillholes and sediment thickness according to the slopes position classes.

Clase	Área (km <sup>2</sup> )	No pozos*	Esp_min	Esp_medio	Esp_max
Valles	197	21/88	1.3	9.93	21.8
Zonas llanas	1228	884/332	0.5	14.9	163
Laderas	678	194/297	0.5	13.7	108.4
Cimas	194	29/99	0.2	9.3	20.7

\*Número de pozos, numerador-pozos que cortan sedimentos, denominador-pozos que cortan roca, Esp\_min-espesor mínimo, Esp\_medio-espesor promedio, Esp\_max-Espesor máximo.

\*Number of boreholes, numerator-wells intersecting sediment, denominator-wells intersecting rock, Esp\_min-minimum thickness, Esp-average thickness, Esp\_max-maximum thickness.

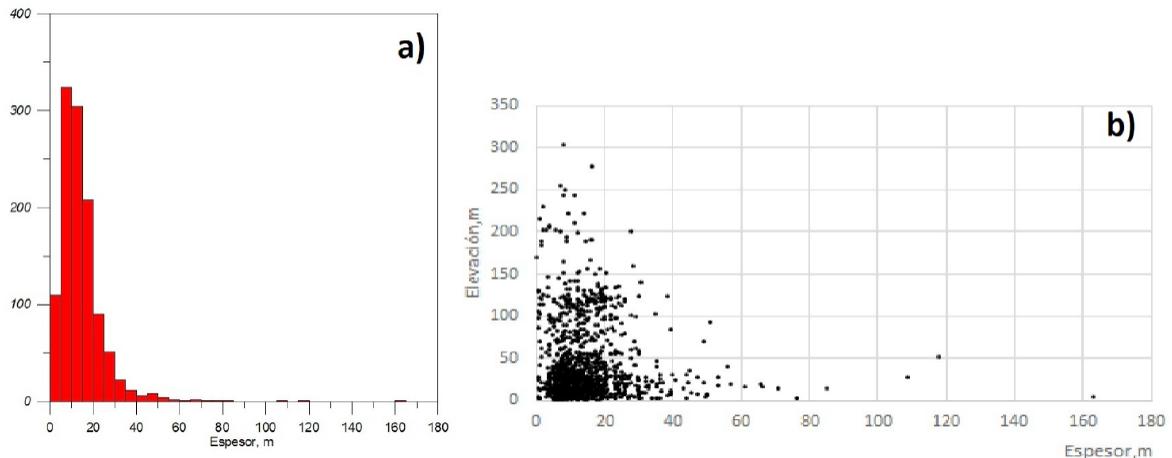
cos, clases del histograma con frecuencias máximas, se encuentran en el rango entre 5 y 15 m, lo que demuestra el desarrollo limitado de los sedimentos recientes en el área de trabajo.

No se evidencia correlación entre los espesores y la altimetría, aunque el análisis del diagrama de dispersión revela algunas regularidades. Los sedimentos con espesores extremos (superiores a 40 m) se distribuyen en zonas con cotas inferiores a 50 m, coincidiendo con las zonas llanas hacia los bordes del área, mientras que en las partes más elevadas del relieve los espesores son discretos. Como

generalidad la nube de puntos se concentra en cotas inferiores a 60 m (zonas bajas y de poca pendiente) y de espesores inferiores a los 20 m.

#### 4.3. Análisis morfológico

El relieve y la posición en las pendientes condiciona los procesos de meteorización, erosión y acumulación y por consecuencia los tipos de sedimentos que se depositan. De acuerdo a la posición de las pendientes el relieve del área se clasificó en 4 clases morfológicas: cimas, laderas, zonas llanas y valles (Tabla 2). Cada una



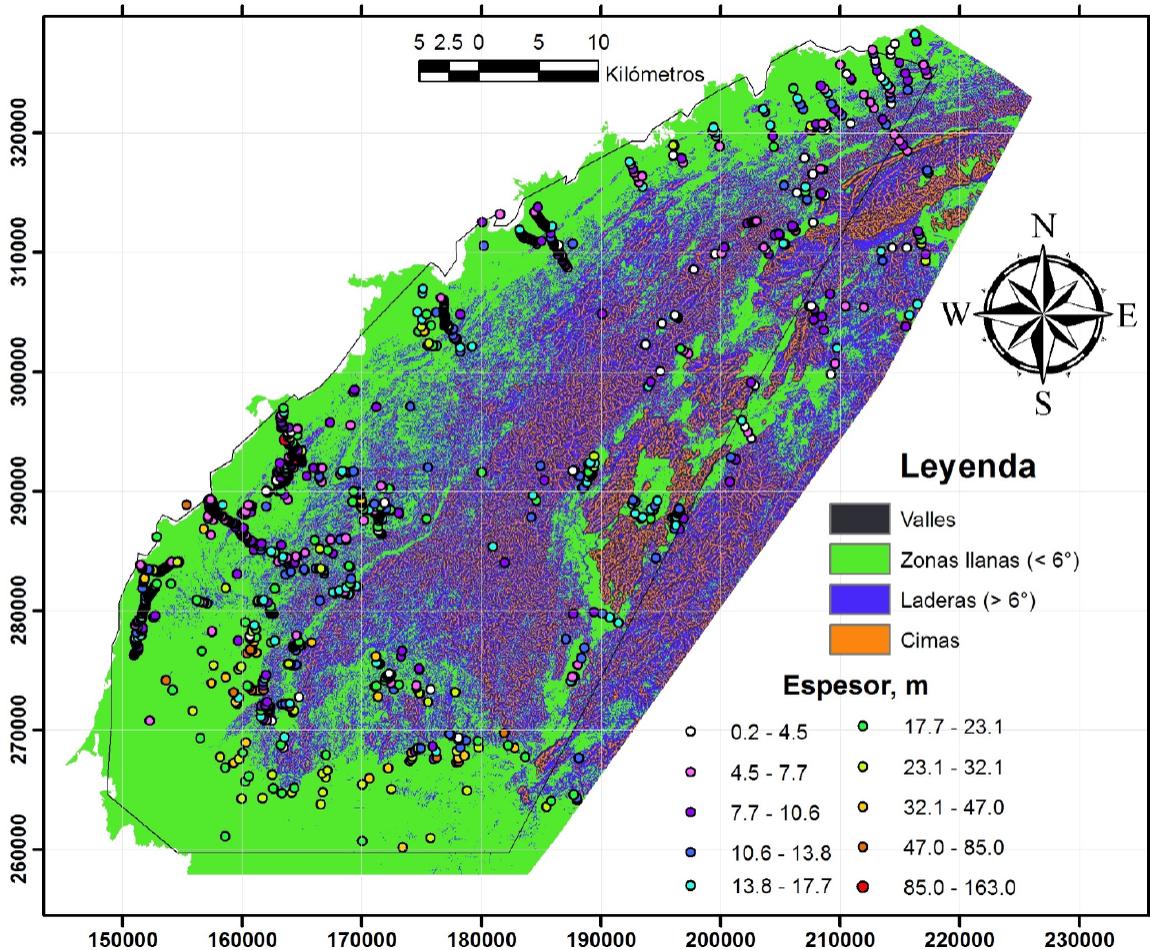
**Figura 7.** Gráficos de los espesores de los sedimentos recientes. a) Histograma indicando el carácter asimétrico de la distribución y los rangos de espesores más frecuentes. b) Gráfico de dispersión entre la cota del relieve y los espesores mostrando la ausencia de correlación entre ambas variables.

**Figure 7.** Graphs of recent sediment thicknesses. a) Histogram indicating the asymmetric nature of the distribution and the most frequent thickness ranges. b) Scatterplot between the elevation of the relief and the thicknesses showing the absence of correlation between both variables.

**Tabla 3.** Caracterización estadística de los espesores de las regolitas desarrolladas sobre las diferentes unidades de roca pre-cuaternaria.

**Table 3.** Statistical characterization of the thicknesses of the regoliths developed on the different pre-Quaternary rock units.

Unidad	No Pozos	Esp_min	Esp_max	Esp_media
Basaltos y diabasas	26	8.2	108.7	19.27
Mb. Castellanos	113	0.5	51	13.66
Fm. Esperanza	427	0.7	50	12.37
Gabros	45	2.8	30	16.56
Fm. Manacas	122	0.2	117.8	12.74
Fm. San Cayetano	104	1	56	12.98

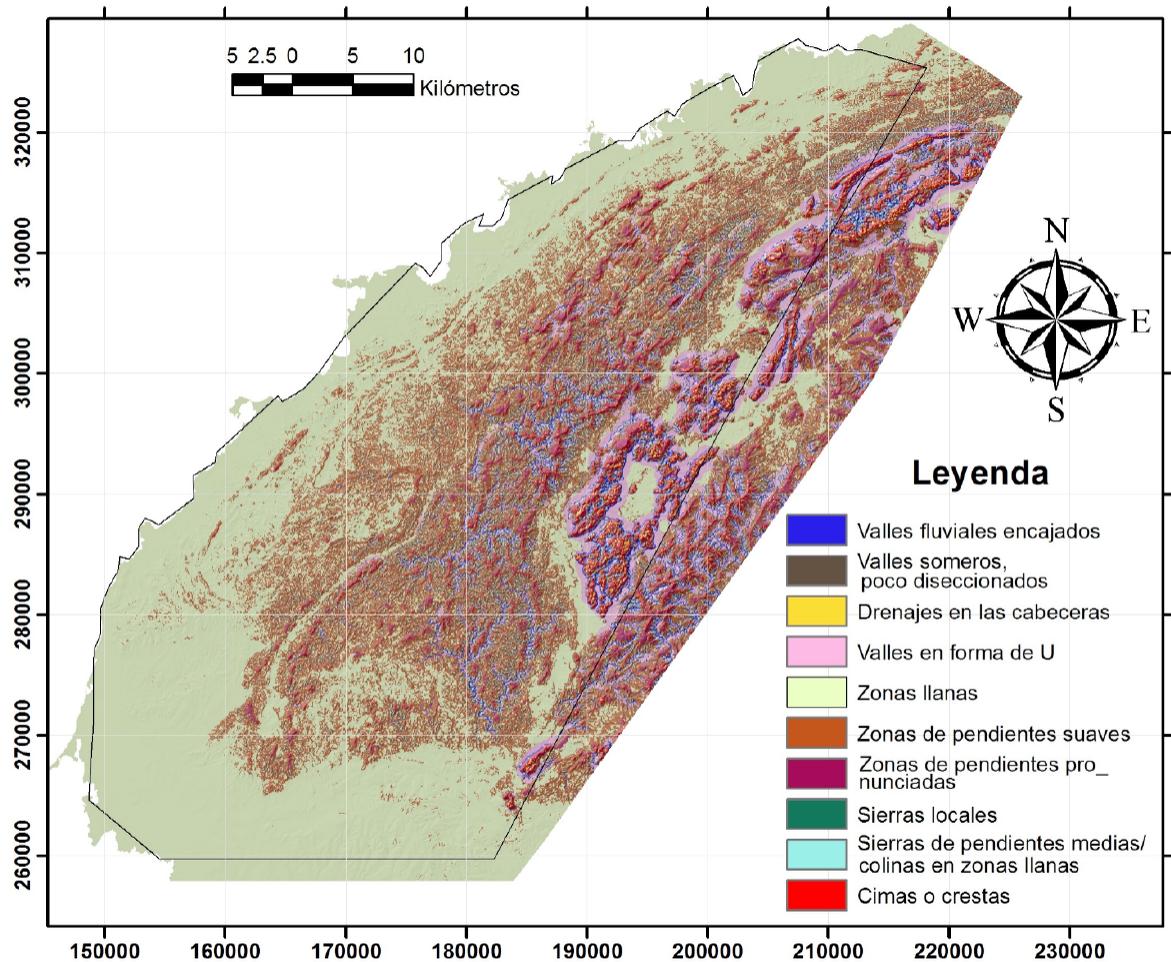


**Figura 8.** Mapa de clasificación morfológica del relieve de acuerdo al índice de posición topográfica y la pendiente según Weiss (2001), y los espesores de sedimentos cortados en los pozos de perforación.

**Figure 8.** Relief morphologic classification map based on topographic position index and slope, according to Weiss (2001), and the thickness of sediments cut in the drillholes.

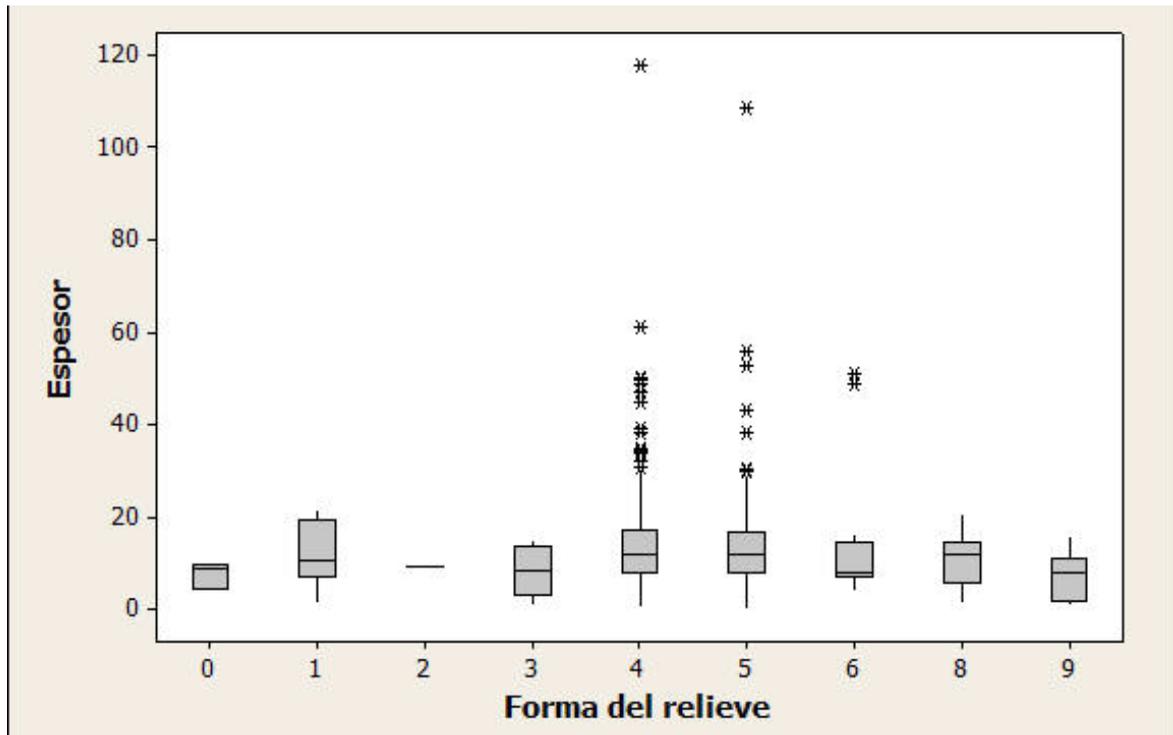
de ellas muestra una distribución espacial típica y un determinado desarrollo de sedimentos recientes. La cimas o superficies cumbrales predominan en las zonas más elevadas, coincidiendo con la faja de mogotes y Alturas de Pizarras del Norte, aquí los sedimentos tienen espesores inferiores a 10 m y poco rango de variación, además de un origen eluvial.

Las regiones más bajas están ocupadas por zonas de valle, cañadas y vaguadas (Fig. 8), coincidiendo muchas de estas con ríos de orden superior, algunos incluso solo activos durante los períodos lluviosos del año, en estos lugares es muy factible la acumulación de los depósitos aluviales. En esta clase los espesores fluctúan entre 1,3 y 21,8 m.



**Figura 9.** Mapa de formas del relieve, basado en la combinación de índices de posición topográfica con vecindades  $R_1=100$  m y  $R_2=300$  m, según Weiss (2001). Nótese el predominio de las zonas llanas en los valles intramontanos de la Sierra de los Órganos y en los bordes del área, mientras que las Alturas de Pizarras prevalecen las cimas y las zonas de pendientes pronunciadas y suaves.

**Figure 9.** Landforms map, based on combined topographic position indices with neighborhoods  $R_1=100$  m and  $R_2=300$  m, according to Weiss (2001). Note the predominance of plains in the intramontane valleys of the Sierra de los Órganos and on the edges of the area, while in the Alturas de Pizarras the mountain tops and the areas with open and upper slopes prevail.



**Figura 10.** Diagrama de caja mostrando la distribución del espesor por formas de relieve. 0-Valles fluviales encajados, 1-Valles someros, poco diseccionados, 2-Drenajes en las cabeceras, 3-Valles en forma de U, 4-Zonas llanas, 5-Zonas de pendientes suaves, 6-Zonas de pendientes pronunciadas, 8-Sierras de pendientes medias, 9-Cimas o crestas.

**Figure 10.** Boxplot showing the distribution of thickness by landforms. 0-Deeply incised streams, 1-Shallow valleys, 2-Upland drainages/ headwaters, 3-U-shape valleys, 4-Plains, 5-Open slopes, 6-Upper slopes, 8-Midslope ridges, 9-Mountain tops.

Las zonas llanas, con pendiente de menos de 6°, se distribuyen en los valles intramontanos y bordeando la cordillera, tanto por el noroeste como por el sur, ocupan el 53 % del área de estudio.

En las laderas con pendientes más pronunciadas (mayor de 6°), encontramos sedimentos que están siendo arrastrados ladera abajo, ya sea por la fuerza de gravedad o por aguas estacionales. Tanto en las zonas llanas como en las laderas los sedimentos acumulados muestran una génesis eluvio-coluvio-proluvial. Los espesores observados son comparables con los de las zonas llanas.

Por otra parte, el mapa de formas de relieve indica que las zonas llanas y las laderas de pendientes suaves y pronunciadas son las geoformas predominantes (Fig. 9), al tiempo

que los sedimentos recientes se distribuyen de manera no uniforme en cada una de ellas (Fig. 10).

Los depósitos superficiales tienen poco desarrollo o están ausentes sobre las sierras locales y zonas de drenaje de las cabeceras, mientras que alcanzan los espesores máximos en las zonas llanas y las laderas de pendientes suaves, precisamente los sitios donde se acumulan los sedimentos arrastrados desde las zonas más elevadas.

#### 4.4. Control litológico sobre el desarrollo de las regolitas

Con vistas a analizar el control que las principales unidades litoestratigráficas ejercen sobre el desarrollo de los sedimentos recientes

tes y determinar las más susceptibles a los procesos de meteorización y formación de las regolitas se determinó la formación geológica sobre la que se sitúa cada pozo (Fig. 6). El análisis se concentró en las formaciones pre-cuaternarias constituidas por roca dura (Tabla 3) y sobre las cuales se pueden acumular los mantos de meteorización, específicamente en aquellas áreas donde en el mapa disponible del Cuaternario (1: 250 000) no fueron delimitados anteriormente los depósitos eluvio-coluvio-proluviales. El 74 % de los pozos se localizan sobre las formaciones pre-cuaternarias.

Atendiendo a los valores medios de los espesores las regolitas alcanzan su mayor desarrollo sobre las rocas máficas (basaltos, gabros y diabasas), las cuales resultan más susceptibles a la meteorización que las rocas terrígenas y carbonatadas-terrígenas (formaciones San Cayetano, Esperanza y el miembro Castellanos), que afloran en la región (Tabla 2). En estas últimas los espesores de los depósitos eluvio-coluvio-proluviales son comparable y no se observan diferencias significativas entre ellas.

#### *4.5. Distribución espacial de las tipologías de depósitos y comparación de sus espesores*

En las zonas donde afloran las formaciones geológicas más viejas se desarrollan las regolitas, que constituyen los depósitos eluvio-coluvio-proluviales, y que descansan sobre las rocas sólidas inalteradas. En función del protolito que se altera se diferencian dos tipos principales de depósitos: a) los desarrollados sobre rocas terrígenas, pertenecientes fundamentalmente a la Fm. San Cayetano y su Mb. Castellanos y b) los formados sobre calizas, que poseen un limitado desarrollo, y se localizan geográficamente en las inmediaciones de los mogotes. En la franja norte, en las proximidades de la costa, se describieron testigos de perforación que por sus características se asocian con los depósitos palustres y marinos. Solamente seis pozos interceptan dichos depósitos. En la parte meridional del área de estudio los sedimentos descritos en

los pozos coinciden con las características principales de la Fm. Guane, además de encontrarse pozos con descripciones muy parecidas a la Fm. Guevara, que se intercalan con los conglomerados y arenas arcillosas típicas de la Fm. Guane, posiblemente pertenecientes al conjunto no diferenciable de las formaciones Guane más Guevara (Fig. 6).

Sobre la Cordillera de Guaniguanico predominan los mantos de meteorización (regolitas) y en menor medida los aluviones vinculados a los ríos principales, solo hacia los bordes se acumularon depósitos de génesis marina, palustre y aluvial-marina. En este sentido, los espesores cartografiados por los pozos sobre las rocas pre-cuaternarias se integraron con los depósitos eluvio-coluvio-proluviales para generalizar su distribución espacial.

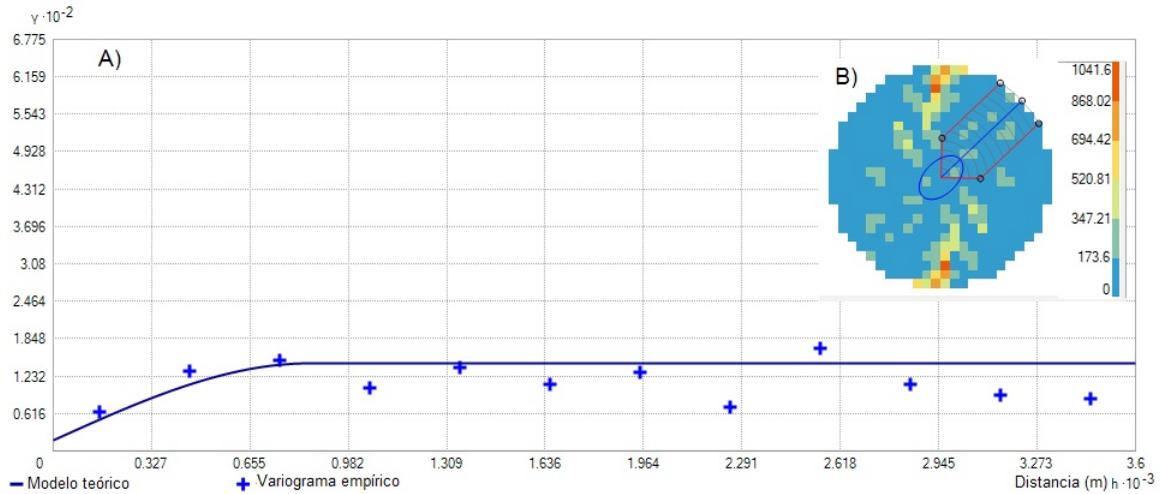
Estos tienen espesores entre 0.5 y 163 m con una media de aproximadamente 14 m. El valor de 163 m parece ser un valor extremo que se ubica en las proximidades del contacto de la Fm. Guane y probablemente se asocia a esta unidad litoestratigráfica. Los depósitos aluviales tienen un rango de espesor entre 1 y 85 m, solo alcanzando los valores máximos en las áreas donde los ríos fluyen sobre la Fm. Guane. Los depósitos palustres, que se encuentran bordeando toda la costa norte y noroeste del área, muestran espesores entre los 5 y 17 m, con una media de 10 m. Los depósitos marinos solo son cartografiables en zonas muy puntuales del área y dada la escala del mapa resulta difícil su apreciación, estos presentan un espesor de alrededor de 8 m. El borde SW de la cordillera está cubierta por sedimentos poco consolidados de la Fm. Guane, las perforaciones arrojan datos de espesores, que varían entre 0.7 y 66 m, con una media de 26 m (Tabla 4).

#### *4.6. Estudio de la continuidad espacial de los espesores de sedimentos*

Con los espesores resultantes de la interpretación de la base de datos se realizó un análisis variográfico con vistas a cuantificar la variabi-

lidad de este parámetro y obtener un modelo matemático que permite interpolar y construir el mapa de isópacas (Fig. 11). Para calcular el variograma se utilizó un paso de 300 m considerando la distancia media entre los pozos que interceptan los depósitos. El variograma omnidireccional revela una estructura espacial con un alcance de aproximadamente 800 m, mientras que el mapa de variograma indica una anisotropía en la dirección N45E (Fig. 11).

Para describir la variabilidad espacial de los espesores de sedimentos se ajustó el siguiente modelo teórico ( $\gamma(h) = 0.17 + 1.27 * \text{Esférico} (850, 527, 45.0)$ ) al variograma empírico. El mismo consta de efecto pepita ( $Co=0.17$ ) y modelo esférico con una meseta de 1.27, alcance máximo de 850 m en dirección N45E y alcance mínimo de 527 m. La anisotropía del espesor, con la máxima continuidad en dirección NE, está en correspondencia con la orientación NE, está en correspondencia con la orientación



**Figura 11.** Variografía de los espesores de sedimentos. A) Variograma direccional y modelo teórico ajustado, B) Mapa de variograma. El mapa muestra la mayor continuidad de los espesores en dirección NE-SW, siguiendo la dirección de la estructura geológica y los rasgos geomórficos.

**Figure 11.** Variography of sediment thicknesses. A) Directional variogram and fitted theoretical model, B) Variogram map. The map shows the greatest thickness continuity in the NE-SW direction, following the direction of the geological structure and geomorphic features.

**Tabla 4.** Caracterización estadística de los espesores de las formaciones/depósitos cuaternarios a partir de la información de pozos.

**Table 4.** Statistical characterization of the thicknesses of the Quaternary formations/deposits from the drillholes information.

Formación o depósito	No Pozos	Esp_min	Esp_max	Esp_media
Depósitos aluviales	64	1	85	18.71
Depósitos palustres	4	5	17.8	10.2
Depósitos marinos	2	7.5	8.2	7.85
Depósitos eluvio-coluvio-proluviales	1010	0.5	163	13.47
Fm. Guane	66	0.7	66	26.05
Guane+Guevara	3	19	36	27.66
Pozos estériles (espesor= 0 m)	1246	0	0	0
	2395			

tación de las principales unidades tectónicas y el relieve del área, lo que indica claramente el control geológico sobre la distribución de los sedimentos.

Finalmente, aplicando los estimadores espaciales inverso de la distancia al cuadrado y *Kriging* ordinario se construyeron los mapas de isópacas que permitieron identificar las principales regularidades espaciales de los depósitos recientes (Fig. 12).

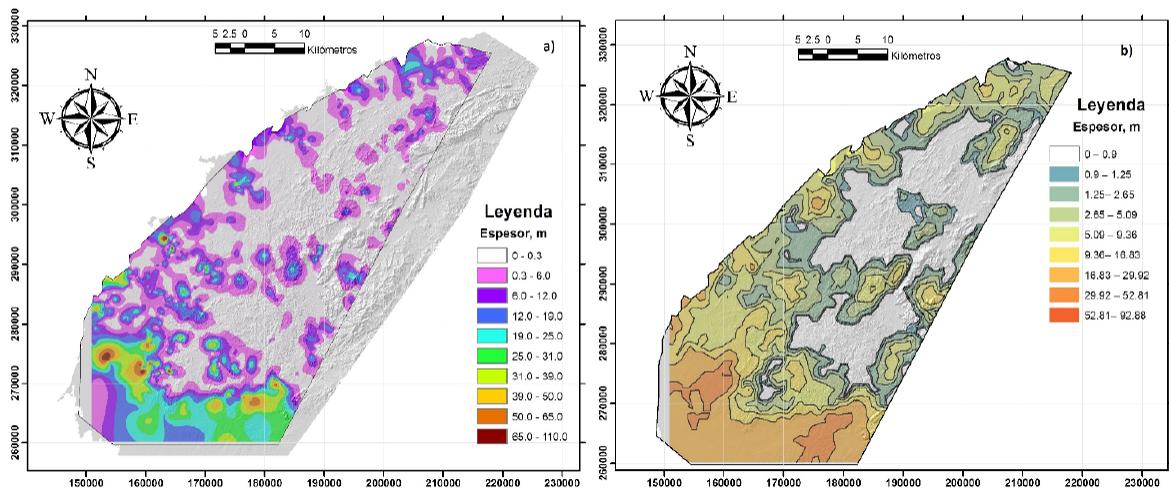
Los mapas reflejan que las regolitas sobre la cordillera de Guaniguanico no forman mantos continuos, existiendo amplios afloramientos de roca pre-cuaternaria, totalmente desprovista de sedimentos. Estos depósitos alcanzan una mayor distribución hacia los márgenes de la cordillera en áreas de menor altura y pendiente y donde afloran las rocas del Mb. Castellanos y la Fm. Esperanza. El límite meridional está cubierto por depósitos de génesis aluvial marino (Fm. Guane y Guane+Guevara), donde los espesores alcanzan los máximos valores.

Como el mapa de isópacas es obtenido a través de la interpolación del espesor en puntos

discretos de observación, relativamente distantes uno de otros, se aplican procedimientos indirectos que permitan su validación. Para corroborar los resultados del análisis de los pozos, el mapa de isópacas se comparó con el mapa de la razón Th/K (Fig. 13) y el mapa de espesores de suelo (Fig. 14). La razón Th/K es reconocida en la literatura como muy útil para delimitar los materiales meteorizados (Dauth, 1997).

Los valores de esta razón muestran un patrón muy similar al revelado por el mapa de isópacas, donde las zonas anómalas coinciden espacialmente con las áreas cubiertas por sedimentos resultantes de la meteorización y donde se presentan los máximos espesores (Fig. 13). Los depósitos holocénicos no son revelados por este mapa. Por otra parte, el mapa de espesores (Fig. 14) de suelo, también confirmó las regularidades en la distribución de los depósitos estudiados, con los mayores espesores hacia los bordes del área de estudio y amplios afloramientos de roca dura pre-cuaternaria.

Finalmente, se actualiza el mapa de depósitos cuaternarios (Fig. 15) considerando los re-



**Figura 12.** Mapas de isópacas de los depósitos recientes, interpolados por el método de Inverso de la Distancia (IDW) y el Kriging Ordinario (KO), mostrando los mayores espesores hacia el SW del área y la existencia de amplias zonas desprovistas de regolitas en la cordillera.

**Figure 12.** Isopach maps of the recent deposits, interpolated by the Inverse Distance Method (IDW) and Ordinary Kriging (KO), showing the greatest thicknesses towards the SW of the area and the existence of extensive zones devoid of regoliths in the Cordillera.

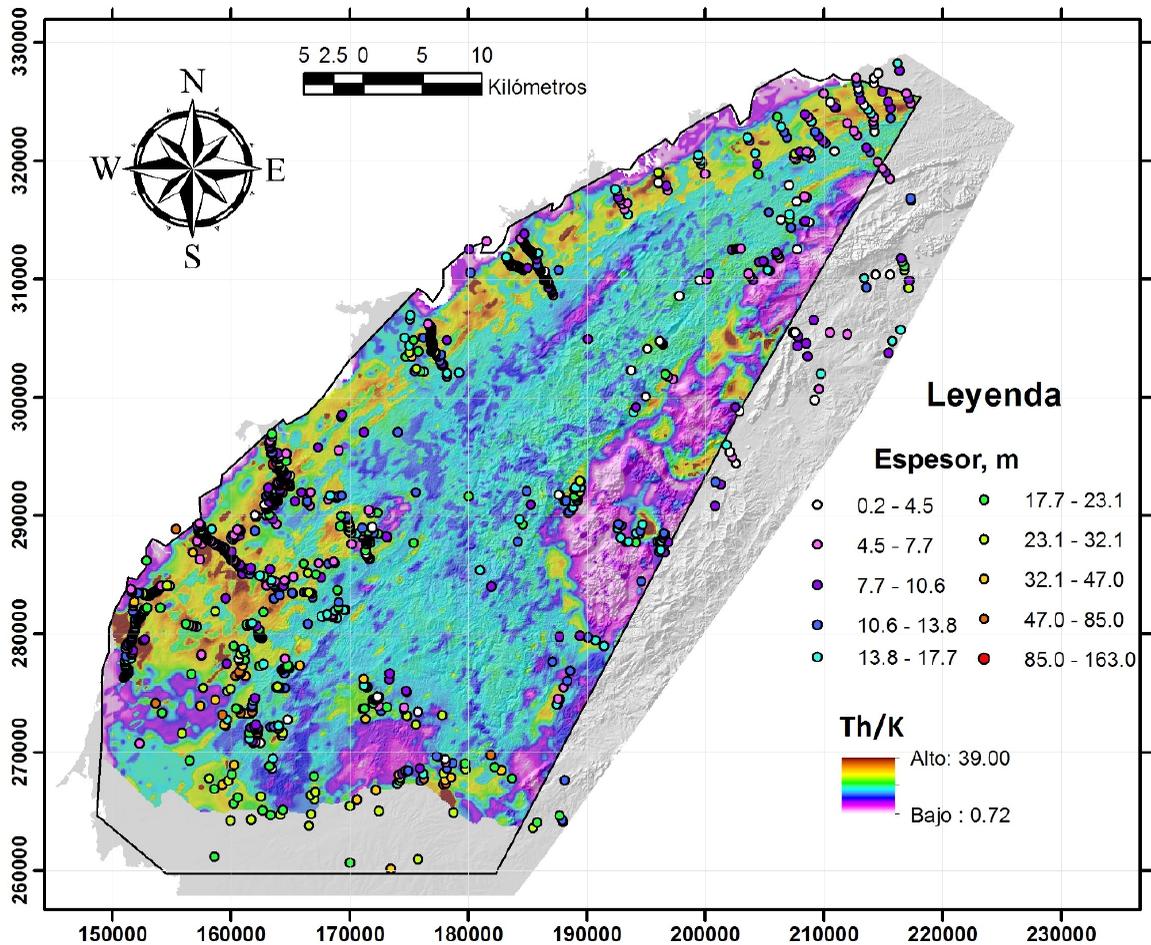
sultados de este trabajo, precisándose mejor las zonas cubiertas por los depósitos eluvio-coluvio-proluviales y donde afloran rocas pre-cuaternarias, además se complementa con las isólinas de espesor.

### 5. Discusión de los resultados

El nuevo mapa obtenido revela que la distribución espacial de las regolitas en la Cordillera de Guaniguanico es mucho más amplia que lo que aparece reflejado en los mapas geológicos disponibles. Estas se desarrollan

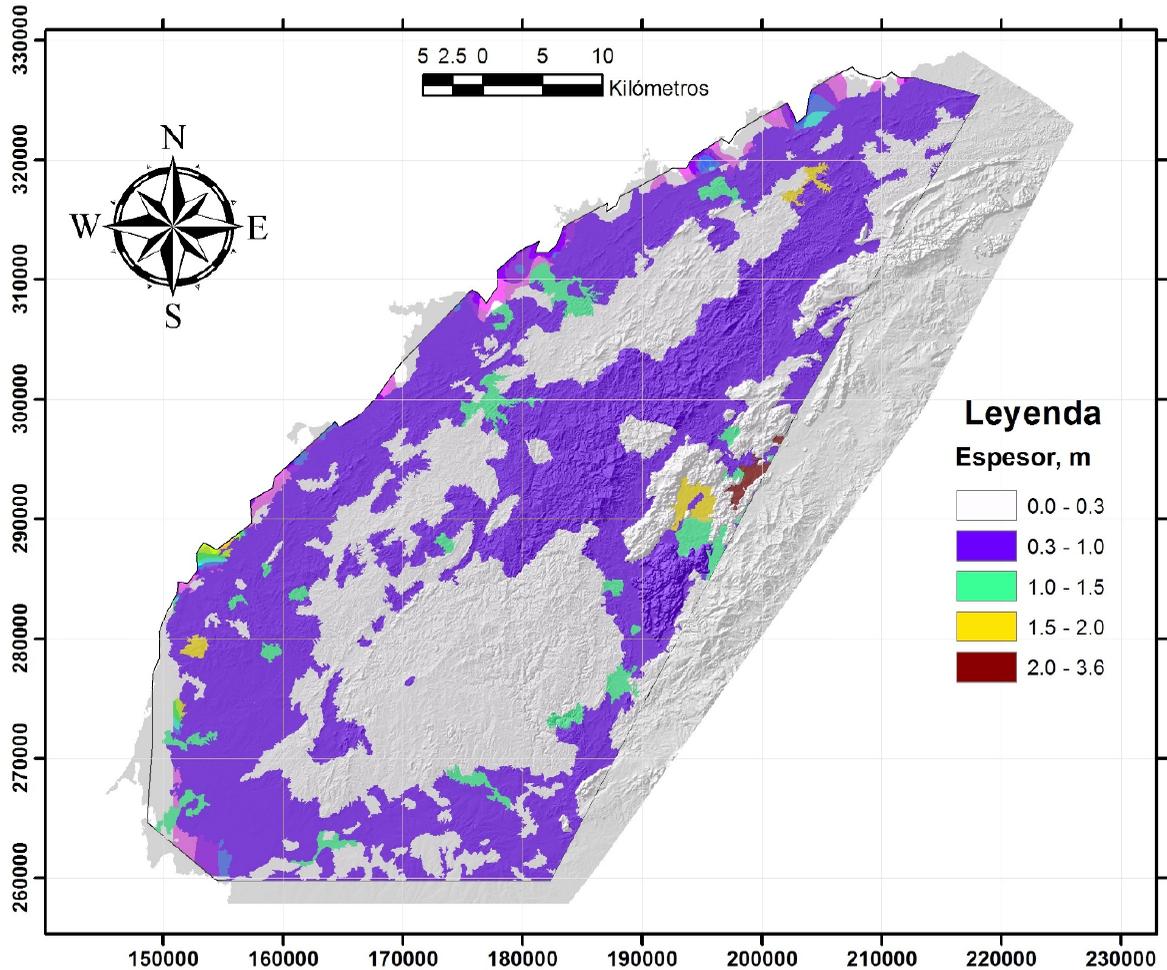
fundamentalmente sobre los afloramientos del Miembro Castellano y la Fm. Esperanza, específicamente en las zonas donde el relieve está menos diseccionado, coincidiendo con los bordes de la cordillera. Hacia el centro del área de estudio, donde el relieve es más vigoroso, con mayor pendiente y altitud, afloran las rocas pre-cuaternarias, los procesos gravitacionales y la erosión superficial transportan pendiente abajo los productos de la meteorización, impidiendo su acumulación *in-situ*.

Por otra parte, el análisis morfológico corrobora que en las cimas de las elevaciones se di-



**Figura 13.** Mapa de la razón entre los canales del Th y el K (Th/K). Los máximos de Th/K cartografían las áreas de mayores espesores de los sedimentos, mientras que los mínimos coinciden con los afloramientos de las rocas pre-cuaternarias.

**Figure 13.** Map of the ratio between the Th and K channels (Th/K). The Th/K maxima map the areas of greatest sediment thickness, while the minima coincide with the outcrops of pre-quaternary rocks.



**Figura 14.** Mapa de espesor de suelo. El patrón de distribución espacial de los suelos coincide con el de los depósitos recientes, revelado a partir de los pozos.

**Figure 14.** Soil thickness map. The spatial distribution pattern of the soils coincides with that of the recent deposits, revealed from the drillholes.

ficulta la formación de depósitos cuaternarios (depósitos eluviales), debido a que la erosión actúa rápidamente sobre estos y los materiales son arrastrados y redepositados sobre las laderas de pendientes menos pronunciadas, formando los depósitos proluviales o en las bases de las vertientes (zonas llanas), como depósitos coluviales. Tampoco se puede desdeñar el hecho de que las condiciones de poca accesibilidad determinan el menor número de perforaciones realizadas en estas formas del relieve. Naturalmente, los máximos espesores, así como los valores promedios de los depósitos eluvio-coluvio-proluviales, se con-

centran en las zonas llanas y laderas de poca pendiente, en los valles intramontanos de la Sierra de los Órganos y zonas de afloramiento de las secuencias siliciclásticas en las Alturas de Pizarras.

Los depósitos desarrollados sobre las formaciones terrígenas muestran poco espesor, debido a la composición mineralógica de estas rocas, predominantemente siliciclásticas, con abundancia de granos cuarzo-feldespáticos y altos contenidos de minerales arcillosos, lo cual limita el desarrollo de potentes espesores de alteritas. Las diferentes unidades

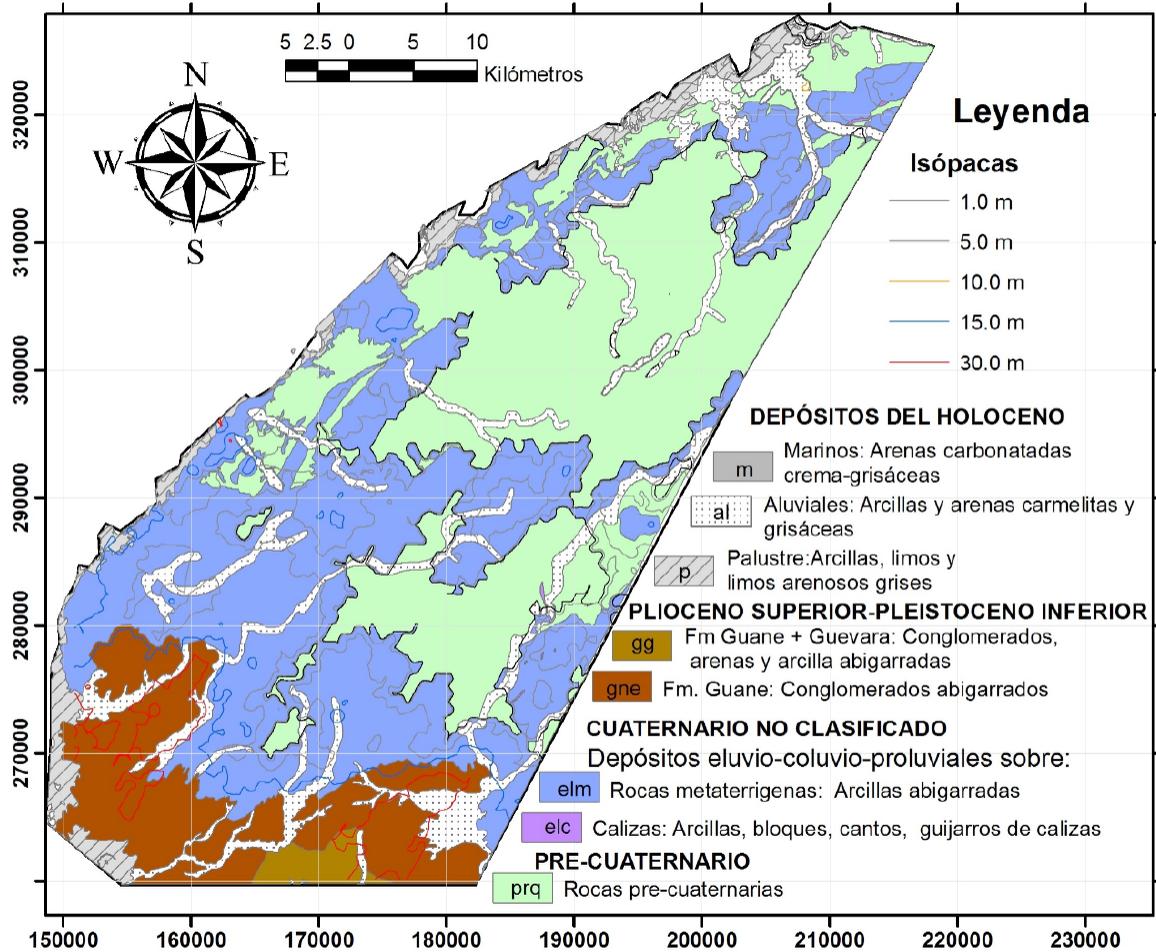


Figura 15. Mapa de depósitos cuaternarios con las isólinas de los espesores. Nótese los amplios afloramientos de rocas pre-cuaternaria, rodeados por depósitos eluvio-coluvio-proluviales.

Figure 15. Map of Quaternary deposits with thickness contours. Note the extensive outcrops of pre-Quaternary rocks, surrounded by eluvial-colluvial-proluvial deposits.

litoestratigráficas de composición siliciclástica (Esperanza, Castellanos y la Esperanza), no muestran diferencias sustanciales en la susceptibilidad a la meteorización, lo cual se refleja en los espesores comparables de las regolitas que sobre ellas se desarrollaron. En este sentido, el patrón espacial de los depósitos eluvio-coluvio-proluviales, que muestran mayor distribución sobre la Fm. Esperanza y el Mb. Castellanos, que sobre la Fm. San Cayetano, no es consecuencia de diferencias en las composiciones litológicas, sino de las condiciones geomórficas contrastantes en sus áreas de afloramientos.

La excelente correspondencia entre las zonas anómalas del mapa de la razón Th/K con las áreas de distribución de los depósitos eluvio-coluvio-proluviales refleja el empobrecimiento en K, resultante de la alteración de los minerales aluminosilicatados, fundamentalmente el feldespato potásico, y su transformación en arcillas caoliníticas. De igual forma, la relación espacial entre las áreas de distribución de los horizontes edáficos y los depósitos cuaternarios corroboran que los suelos tienen mayores posibilidades de desarrollo allí donde los sedimentos poseen los mayores espesores.

El número reducido de pozos que cortaron los depósitos holocénicos (palustres, aluviales y marinos) permitió confirmar sus áreas de distribución, limitadas a una franja norte en las proximidades de la costa, mientras que en la parte meridional las formaciones terrígenas (Guane y Guevara) yacen de forma transgresiva sobre las formaciones pre-cuaternarias de la cordillera.

## 6. Conclusiones

La recopilación, procesamiento y análisis de los pozos de investigaciones geológicas regionales demostró ser una vía eficaz para actualizar el mapa de depósitos cuaternarios, permitiendo la identificación, clasificación y estimación de los espesores de los depósitos. El área está compuesta fundamentalmente por alturas medias con inclinaciones entre 2° y 15°, predominando las zonas llanas y las laderas de pendiente suave. Es en estas formas del relieve donde los depósitos cuaternarios alcanzan su máximo desarrollo, los que se concentran en zonas con cotas inferiores a 60 m y poseen espesores menores a 20m.

El estudio permitió identificar los siguientes tipos de depósitos: aluviales, eluvio-coluvio-proluviales, marinos, palustres y depósitos terrígenos formados por las Fm. Guane y Guane+Guevara. No se evidenció correlación entre los espesores y la altimetría, aunque el relieve y la posición en las pendientes condiciona los tipos de sedimentos que se depositan. Los depósitos eluvio-coluvio-proluviales son los de mayor extensión en el área ocupando casi un 40% de la misma, con un espesor entre 5 y 40 m y una media de 15.5 m. Estas regolitas no forman mantos continuos, existiendo amplias zonas de afloramiento de rocas pre-cuaternarias, específicamente en las áreas, donde aflora la Fm. San Cayetano.

El patrón de distribución de los espesores de los depósitos cuaternarios, revelados a partir de los datos de pozos, fue confirmado por el mapa de espesor de suelo y el de las razones

de los radioelementos Th/K. Las anomalías de esta relación coinciden espacialmente con las áreas de distribución de las regolitas.

## Agradecimiento.

Los autores agradecen al Ing. Agustín Robaina Iglesias de la Empresa Geominera de Pinar del Río por la propuesta inicial de la investigación y los datos proporcionados.

## Bibliografía

- Anand, R. R. (2001). Evolution, classification and use of ferruginous regolith materials in gold exploration, Yilgarn Craton, Western Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1, 221-236. <https://doi.org/10.1144/geochem.1.3.221>
- Anand, R. R., Butt, C. R. (2010). A guide for mineral exploration through the regolith in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(8), 1015-1114. <https://doi.org/10.1080/08120099.2010.522823>
- Anand, R. R., Paine, M. (2002). Regolith geology of the Yilgarn Craton, Western Australia, Implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49, 4-162. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2002.00912.x>
- Arbogast, A. F., Johnson, W. C. (1994). Climatic implications of the late Quaternary alluvial record of a small drainage basin in the central Great Plains. *Quat. Res*, 41, 298-305. <https://doi.org/10.1006/qres.1994.1034>
- Astájov, K, Solianik, V, Secíliev, V, Martínez, D, Fernández, R, Orbiña, J, Demídiv, S, Santa María, Z. (1982). Trabajos de levantamiento geológico a escala 1: 50 000 en la parte NO de la provincia de Pinar del Río (Hojas 3484-III, 3483-IV y 3483-III-A). Informe inédito, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas, La Habana.
- Bolster, J. S. (1999). Regolith mapping. is it necessary? *Exploration Geochemistry for the New Millennium. Australian Institute of Geoscientists Bulletin*, 30, 125-135.
- Bottelin, P., Dufrechou, G., Seoane, L., LLubes, M., Monod, B. (2019). Geophysical methods for mapping Quaternary sediment thickness: Application to the Saint-Lary basin (French Pyrenees). *Comptes Rendus Geoscience*, 351(6), 407-419. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2019.07.001>

- Brown, A. D., Hill, S. M. (2004). Regolith-landform maps are an essential tool for interpreting regolith geochemistry- the White Dam, SA, experience. In: Proceedings of the CRC LEME Regional Regolith Symposia Roach, I.C. (ed.), CRC LEME, Perth, 37-41.
- Búrov, V., Martínez, D., Tusainev, Y., Fernández, R., Derbenev, V., Uspinsky, A. (1987). Informe sobre los trabajos de levantamiento Geológico a escala 1: 50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río (Hojas 3382-I, IV; 3383-I, II, III; 3482-IV a, c; 3483-III c). Informe inédito, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas, La Habana.
- Butt, C. R., Lintern, M. J., Anand, R. R. (2000). Evolution of regolith and landscapes in deeply weathered terrain-implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, 16, 167-183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00029-3)
- Cobiella-Reguera, J. L. (2000). Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de Guaniguanico, Cuba occidental. *Minería y Geología*, XVII (1), 5-15.
- Cobiella-Reguera, J. L. (2008). Reconstrucción palinospástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3), 382-401.
- Cobiella-Reguera, J. L., Olóriz, F. (2009). Oxfordian - Berriasian stratigraphy of the North American paleomargin in western Cuba: Constraints for the geological history of the proto-Caribbean and the early Gulf of Mexico. In: C. Bartolini, J. R. Román Ramos, (Ed.), *Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico*, AAPG Memoir 90, 421 - 451. <https://doi.org/10.1306/13191304M903339>
- Cohen, D. R., Kelley, D. L., Anand, R., Coker, W. B. (2010). Major advances in exploration geochemistry, 1998-2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1), 3-16. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-215>
- Cornelius, M., Smith, R. E., Cox, A. J. (2001). Laterite geochemistry for regional exploration surveys-a review, and sampling strategies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1(3), 211-220. <https://doi.org/10.1144/geochem.1.3.211>
- Dauth, C. (1997). Airborne magnetic, radiometric and satellite imagery for regolith mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. *Exploration Geophysics*, 28(2), 199-203. <https://doi.org/10.1071/EG997199>
- Demek, J. (1972). Manual of detailed geomorphological mapping. Academia for the International Geographical Union, Commission on Geomorphological Survey and Mapping, Prague, 344 pp.
- Díaz, J. L., Magaz, A. R., Portela, A., Bouza, O., Hernández, J. R. (1989). El Relieve de Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 18, 33-44.
- Díaz-Guanche, 2017. El desarrollo del carso epigenético en el modelo evolutivo de la región central de la Sierra de los Órganos. Tesis doctoral, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río. 174 pp.
- García, P. C., Sand, F. G., Marotta, G. S., Menezes, B. J., Barbosa S. N., Llacer R. H. (2012). Spatial Interpolation Applied a Crustal Thickness in Brazil. *Journal of Geographic Information System*, 4, 142-152. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.42019>
- García-Delgado, D. E., Gil-González, S., Delgado, R.D., Millán, G., Peñalver, L. L., Cabrera, M. C., Denis, R., Chang, J.L., Fuentes, M., Díaz C. O., Suárez, V., Llanes, A. I., Pérez, R. A., Torres, M., Pérez, C.P., Díaz de Villalvilla, L.C. (2005). Mapa geológico de la provincia de Pinar del Río a escala 1: 100 000 en base digital. *Geociencias 2005*, La Habana, Cuba.
- Gonzalez-Alvarez, I., Boni, M., Anand, R. R. (2016). Mineral exploration in regolith-dominated terrains: Global considerations and challenges. *Ore Geology Reviews*, 73, 375-379. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.11.017>
- Griggs, J., Bamber, J. (2017). Antarctic ice-shelf thickness from satellite radar altimetry. *Journal of Glaciology*, 485-498. <https://doi.org/10.3189/002214311796905659>
- Hatten, C. (1957). *Geology of Central Sierra de los Órganos*, Pinar del Río Province, Cuba.
- Heckrath, G., Djurhuus, J., Quine, T. A., Van Oost, K., Govers, G., Zhang, Y. (2005). Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *J. Environ. Qual*, 34, 312-324.
- Hocking, R. M., Langford, R. L., Thorne, A. M., Sanders, A. J., MORRIS, P., STRONG, C., Gozzard, J. R. (2001). A classification system for regolith in Western Australia. *Western Australia Geological Survey*.
- Iturralde-Vinent, M. A. (1994). Cuban geology: a new plate tectonic synthesis. *Journ. Petrol. Geol.*, 17(1), 39-70. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1994.tb00113.x>
- Iturralde-Vinent, M. A. (1996). Introduction to Cuban geology and geophysics, en Iturralde-Vinent, M. (ed.), *Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba*. 254 pp. In: *Ophiolites and volcanic*

- arcs of Cuba. Iturralde-Vinent, M. (ed.) Miami. Florida: 83-120(
- Iturralde-Vinent, M. A. (1998). Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geol. Hispánica*, 33(1-4), 9-56.
- Kartashov, I.P. Mayo, N., Cherniajovski, A.G. Peñalver, L. L. (1981). El Antropógeno en Cuba. Ed. Nauka. Moscú, 145 pp
- Lawley, R., Garcia-Bajo, M. (2010). The National Superficial Deposit Thickness Model (SDTM V5): A User Guide. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Malvić, T., Jović, G. (2012). Thickness maps of Neogene and Quaternary sediments in the Kloštar Field (Sava Depression, Croatia). *Journal of Maps*, 260-266. <https://doi.org/10.1080/17445647.2012.710463>
- Martínez, D., Fernández de Lara, R., Peláez, R., Vázquez, M., Barrios, E., Valido, A., Pizlangas, J. (1991). Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y prospección preliminar a escala 1: 50000 Pinar - Habana. Informe inédito, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas, La Habana.
- Martínez, D. y Fernández De Lara, R. (1988). Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y búsqueda acompañante a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Informe inédito, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas, La Habana.
- Merrill, G. P. (1897/1906). A Treatise on Rocks, Rock-Weathering and Soils, Ed. The Macmillan Co, New York, 325pp.
- Mondelo, M., y Sánchez, R. (2011a). Mallas del campo gravimétrico, aeromagnético y espectrometría gamma aérea (canales: IGT, U, Th y K) a escala 1:50 000. Informe del Instituto de Geología y Paleontología, La Habana (inédito). Ministerio de la Agricultura (2002). Mapa de suelos a escala 1:25 000. Instituto de Suelos. La Habana.
- Nemec, W., Kazanci, N. (1999). Quaternary colluvium in West-Central Anatolia: sedimentary facies and paleoclimatic significance. *Sedimentology* 46, 139-170. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1999.00210.x>
- Nicolet, J. P., Erdi-Krausz, G. (2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Ed.: International Atomic Energy Agency, IAEA, Austria, 171 pp.
- Pedrerá, A., Galindo-Zaldívar, J., Duque, C., Marín-Lechado, C. (2007). Espesor de los sedimentos neógenos y cuaternarios en el Corredor del Almanzora a partir de datos gravimétricos (Cordillera Bética oriental). *Geogaceta*, 42, 39-42
- Peñalver, L. L., Cabrera, M., Trujillo, H., Morales, H., Pérez Lazo, J., Fundora, M., Pedroso, I. (2001). Cambios Climáticos en Cuba Occidental durante el Cuaternario sobre bases Geológicas. Inédito. Arch. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana.
- Peñalver, L., Denis, R., Martín, D., Nuñez, A., Rodríguez, L. (2020). Mapa digital de los depósitos cuaternarios de la zona emergida de Cuba a escala 1:250 000. Ed. Centro Nacional de Información geológica/Instituto de Geología y Paleontología, Habana, 299 pp.
- Peñalver, L., Denis, R., Martín, D., Nuñez, A., Rodríguez, L. (2021). Geología del Cuaternario de Cuba. Ed. Centro Nacional de Información geológica/Instituto de Geología y Paleontología, Habana, 75 pp.
- Pérez, R. O. (2018). La Cartografía Geológica de Cuba. Ed. Centro Nacional de Información geológica/Instituto de Geología y Paleontología, Habana, 136 pp.
- Piotrowska, J. (1978). Nappe structures in the Sierra de Los Organos, western Cuba. *Acta Geologica Polonica*, 28 (1), 1-96.
- Ponce, N., Daniliuk, L., Razomsk, O., Dilla, M., Domínguez, A. Y., Osipov, V. (1985). El yacimiento de bauxitas Pan de Guajaibón en la Isla de Cuba. *Revista tecnológica*, XV (1), 51-60.
- Powell, J. W. (1988). Major Powell's report: operations of the national survey. -Yellowstone Park. - Atlantic coast work. - Archaean geology. - glacial geology. -Appalachian division; classification of soils. *Science* 12 (295), 148-150.
- Pszczolkowski, A. (1978). Geosynclinal Sequence of the Cordillera de Guaniguanico in Western Cuba, their Lithostratigraphy, Facies Development and Paleogeography. *Acta Geologica Polonica*, 28 (1), 1-96.
- Pszczolkowski, A. (1999). The exposed passive margin of North America in western Cuba, En: P. Mann, (ed.), Caribbean Basins, Sedimentary basin of the World. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 93-121. [https://doi.org/10.1016/S1874-5997\(99\)80038-0](https://doi.org/10.1016/S1874-5997(99)80038-0)
- Rigassi-Studer, D. (1963). Sur la géologie de la Sierra de los Organos, Cuba. *Arch. Sci. Soc. Phys. Hist. Nat.*, 16, 339-350.
- Salama, W., González-Álvarez, I., Anand, R. R. (2016). Significance of weathering and regolith/landscape evolution for mineral exploration in the NE Albany-Fraser Orogen,

- Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 73, 500-521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.024>
- Skentos, A. (2018). Topographic Position Index based landform analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece). *Acta Geobalcanica* 4 (1), 7-15. <https://doi.org/10.18509/AGB.2018.01>
- Smith, R. E., Anand, R. R., Alley, N. F. (2000). Use and implications of paleoweathering surfaces in mineral exploration in Australia. *Ore Geology Reviews*, 16(3-4), 185-204. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00030-X)
- Somin, M., Millán, G. (1981). *Geología de los complejos metamórficos en Cuba*. Ed. Nauka, Moscú, 299 pp.
- Weiss, A. D. (2001). Topographic Positions and Landforms Analysis (poster). ESRI International User Conference. San Diego, CA, USA.
- Wilford, J. (2012). A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma* 183-184, 124-142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.022>
- Wilford, J., Bierwirth, P. N., Craig, M. A. (1997). Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17 (2), 201-216.
- Williams, D. P., Watson, A., Goudie, A. S. (1982). Quaternary colluvial stratigraphy, archaeological sequences and paleoenvironment in Swaziland, Southern Africa. *Geogr. J*, 148 (1), 50-67. <https://doi.org/10.2307/634243>

*Recibido el 5 de abril de 2022*

*Aceptado el 20 de marzo de 2023*