

RESEARCH ARTICLE

Age of the epigenetic karst from the central region of Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba

La edad del karst epigenético en la región central de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba

Carlos Díaz Guanche¹, Hermes Farfán González², Leslie F. Molerio León³, Reinaldo Rojas Consuegra⁴, Jesús Pajón Rodríguez⁵, Robert Ramírez Hernández¹, Elmidio Estévez Cruz¹

¹ Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río. Calle Martí No. 300 Barrio Segundo Sur, e/. 27 de noviembre y González Alcor-
ta, Pinar del Río, Cuba. CP: 20100. cdiazguanche@gmail.com; robertrh@upr.edu.cu; estevez@upr.edu.cu

² Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Kilómetro 2 ½ Carre-
tera a Luis Lazo. Pinar del Río, Cuba. hfarfan@ecovida.cu

³ División de Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos. GAMMA S. A. Apartado 6246, CP 10600, Habana 6. La Habana, Cuba. [especialis-
taprincipal@gmail.com](mailto:especialis-
taprincipal@gmail.com)

⁴ Centro de Investigaciones del Petróleo. Calle Churruca No. 481 entre Vía Blanca y Washington, Cerro, La Habana, Código Postal 10200,
Cuba. rojas@ceinpet.cupet.cu

⁵ Museo Nacional de Historia Natural. Calle Obispo, No. 61. Esquina a Oficinas. Habana Vieja. La Habana. Cuba. jesusmpajon@gmail.com

Corresponding author: cdiazguanche@gmail.com (Carlos Díaz Guanche)

ABSTRACT

Key points

Epigenetic karst evolution
model is established for
the central region of
Sierra de los Órganos

Satellite images, aerial
photos, geological survey,
measurements of
morphostructures and
multivariate statistical
analysis are used

The model includes nine
surfaces of erosion base
levels, in a range that
goes from 410 m a.s.l. to
50 m a.s.l.

The epigenetic karst age in the central region of Sierra de los Órganos, is defined from the moment the carbonated sequences are uncovered and denudation processes begin at the end of the Oligocene and early Miocene (approximately 25 Ma). Although the karstic forms in this region originated at different times, they all coexist in today's landscape. While the area was rising up slowly and sea level changes were taking place, the regional erosion base level descended giving rise to leveling surfaces desiccated by numerous sinkholes. At this time, surface currents disappear to become underground streams, which have carved out an extensive network of galleries. Satellite images and aerial photos interpretation, geological survey, measurements of morphostructures and multivariate statistical analysis, were the methods used to establish the epigenetic karst evolution model for the region. The model includes nine surfaces of erosion base levels, in a range that goes from the 410 m a.s.l., coinciding with the older erosion base levels conserved in the area (23 Ma before the present), until the 50 m a.s.l., corresponding to the surface of current erosion.

Keywords: Erosion planes; Caves; Dolines; Epigenetic; Karst.

Article History:

Received: 30/10/2020

Accepted: 13/09/2021

RESUMEN

Puntos clave

Se establece un modelo de evolución para la región central del karst epigenético de Sierra de los Órganos

Se utilizan imágenes de satélite, fotos aéreas, estudios geológicos, medida de morfoestructuras, y análisis estadísticos multivariable

El modelo define nueve niveles de base de erosión para la región, en un rango que va desde los 410 m s.n.m hasta los 50 m s.n.m.

La edad del karst epigenético para en región central de la Sierra de los Órganos queda definida a partir del momento en que afloran las secuencias carbonatadas y comienzan a actuar los procesos denudativos al final del Oligoceno y principios del Mioceno (aproximadamente unos 25 Ma). Aunque las formas kársticas en esta región surgieron en momentos diferentes, todas coexisten en el paisaje de hoy. Mientras, de forma general, le área ascendía lentamente y oscilaba el nivel del mar, descendía el nivel de base regional dando lugar a superficies de erosión disecadas por numerosos sumideros. En este momento, los cursos superficiales desaparecen para convertirse en corrientes subterráneas, que han labrado una extensa red de galerías. La interpretación de imágenes de satélites, fotos aéreas, el levantamiento geológico, la cartografía de formas kársticas, mediciones de morfoestructuras y el análisis estadístico, fueron los métodos utilizados para el establecimiento del modelo evolutivo del karst epigenético en la región, que definió nueve superficies o niveles de base de erosión para la región, en un rango que va desde los 410 m s.n.m., coincidiendo con la superficie de base más antigua conservada en el área (23 Ma antes del presente), hasta los 50 m s.n.m., correspondiente a la superficie de erosión actual.

Palabras clave: Cuevas; Dolinas; Epigenético; Karst; Superficie de erosión.

Historial del artículo:

Recibido: 30/10/2020

Aceptado: 13/09/2021

1. Introducción

La geodiversidad cubana presenta una extraordinaria variedad genética, morfológica y tipológica de rocas, debido a la muy complicada geología del archipiélago, acompañada de disímiles procesos de alteración y modelaje por la acción de fuerzas endógenas y exógenas, lo que ha dado lugar a singulares formas del paisaje.

Una de las principales direcciones de las investigaciones en el campo de las geociencias contemporáneas lo constituye la valoración de la influencia de las condiciones litológicas, estratigráficas y tectónicas, en la conformación de la estructura del relieve moderno, en especial del relieve kárstico (Penck, 1924; White, 1988; Ford and Williams, 1989; Magaz, 1995; Plan *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2011).

El estudio del funcionamiento de los sistemas cársicos, constituye una plataforma sólida para su manejo, pues los problemas de tipo geológico e hidrogeológico que se presentan en estos sistemas, generan altos costos económicos, sociales y medioambientales, que se agravan debido a una insuficiente comprensión de su génesis y evolución (Marinos, 2001; Lolcama *et al.*, 2002; Molerio *et al.*, 2004; Xeidakis *et al.*, 2004; Casa-grande *et al.*, 2005; Waltham and Fookes, 2005; Waltham and Lu, 2007; Day, 2007).

Distintos autores han estudiado las causas y factores vinculados con la dinámica de los proce-

sos de karstificación en la cordillera de Guaniguanico, como el grado de agresividad de las aguas, el régimen de circulación hídrico y la preparación tectónica de los macizos carbonatados en el desarrollo del cavernamiento (Gradziński and Radomski, 1963, 1965, 1967; Panos and Stelcl, 1968 a, b; Molerio, 1984; Núñez *et al.*, 1988; Gutiérrez, 1995; Flores and Flores, 1998; Rocamora, 1998; Rosa, *et al.*, 2004).

Autores como Molerio *et al.* (1999), caracterizan los niveles de cavernamiento del karst de Cuba occidental y plantean su relación con las oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario. Mientras que Hernández, *et al.* (2001), llevan a cabo la reconstrucción paleoclimática y paleoambiental del Pleistoceno Tardío-Holoceno para Cuba occidental.

Aunque diversos han sido los estudios sobre el karst en la región, aún quedan por responder interrogantes, debido a que existen lagunas en aspectos del conocimiento físico y la interpretación de la evolución de los sistemas cársicos en general –y epigenéticos en particular– en el área.

La estimación incorrecta de la edad del comienzo del desarrollo del karst epigenético, así como la inexactitud y escasa profundidad de los estudios relacionados con los niveles de base de erosión en los modelos evolutivos actuales, los convierten en inapropiados para explicar la evolución espacial y temporal de la karstificación para la región.

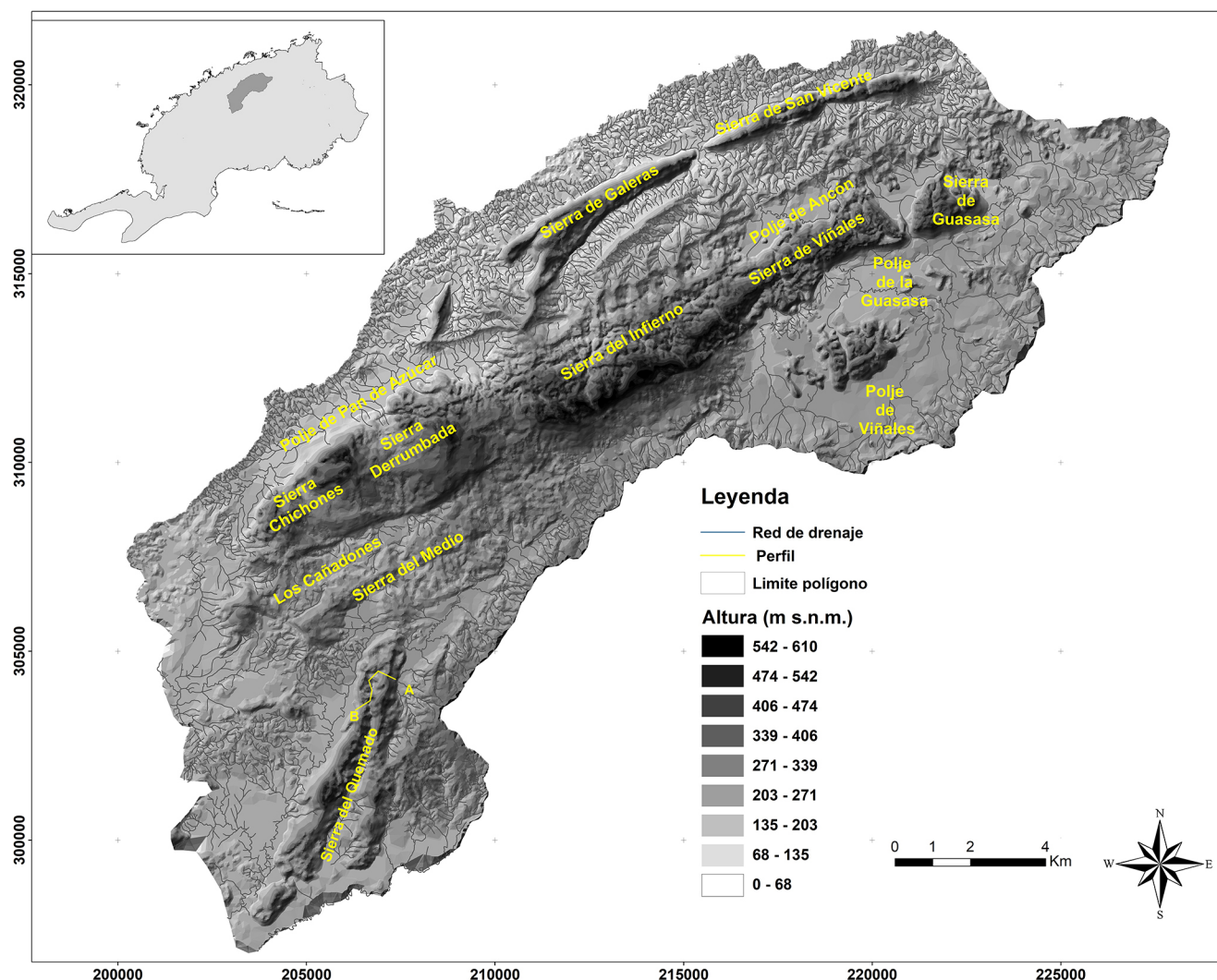


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del área, con los principales accidentes del relieve. Nótese que la gran mayoría de las sierras calcáreas se encuentran distribuidas espacialmente en forma de cadenas alargadas con rumbo noreste-suroeste, a excepción de la Sierra del Quemado, que tiene una dirección norte noreste-sur suroeste. El segmento A – B representa la traza del corte transversal a través de la Sierra del Quemado.

Figure 1. Location map of the study area with the main relief forms. The calcareous ridges are oriented northeast-southwest, except Sierra del Quemado (north northeast-south southwest). The segment A – B represents the trace of cross-section through Sierra del Quemado.

Por esto, establecer un nuevo modelo evolutivo del karst epigenético, a partir de la determinación de la edad de comienzo de la karstificación epigenética y la determinación de los niveles de base de erosión, explicando las variaciones espacio temporales de la karstificación en la región central de la Sierra de los Órganos, ha sido el objetivo de la investigación.

El proceso de karstificación está establecido en todas las rocas solubles y depende de la acción de diversos factores que incluyen estratificación y estado de agrietamiento de las rocas, tiempo de contacto de las aguas en movimiento con las rocas, temperatura, presencia o no de suelos, tipos y contenido de materia orgánica; junto con

los mecanismos intrínsecos como composición, porosidad y textura de las rocas, lo que da lugar a un desarrollo diferenciado de este fenómeno, tal como sucede en la Sierra de los Órganos, en la parte más occidental del archipiélago cubano.

La Sierra de Los Órganos forma parte de la Subzona Cordillera de Guaniguanico, Pinar del Río. Limita al norte con la Llanura Costera del Norte, en su flanco sur por un escalón regional que separa la cordillera de la gran llanura aluvial marina del sur de Pinar del Río, al este con la Sierra del Rosario y al oeste con la Llanura Kársica de Guanahacabibes.

En esta sierra se destacan como formas orográficas particulares los mogotes, en forma de

cadenas o aislados, poljes marginales o de contacto y dolinas u “hoyos de sierra” predominantemente colapsadas. En ella se desarrollan algunos de los mayores sistemas cavernarios de Cuba: Gran Caverna de Santo Tomás (46 km),

Palmarito-Novillo-Pan de Azúcar (35 km), Majaguas-Cantera (31 km), Fuentes (23 km), Constantino-Macagua (11 km).

La región central de la Sierra de los Órganos está limitada por el río San Vicente al este, el río

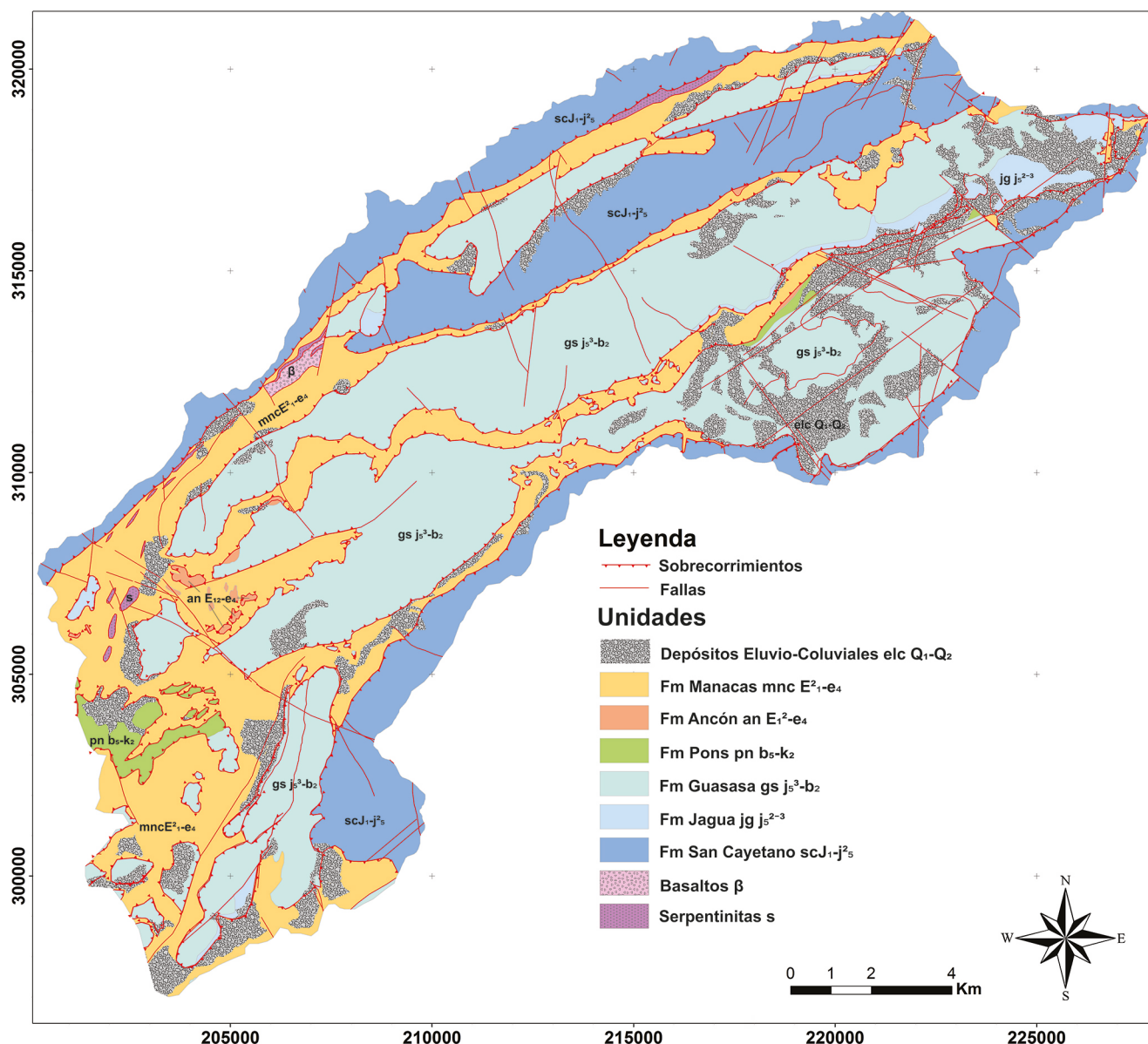


Figura 2. Mapa geológico escala 1:25000 (modificado de García *et al.*, 2011, a partir de la interpretación de imágenes satelitales, fotos aéreas y de las observaciones de campo). Pueden diferenciarse, en general, los tres grandes paquetes rocosos: terrígeno: Formación San Cayetano (Jurásico Inferior - Jurásico Superior (Oxfordiano Medio)); carbonatado y carbonatado – terrígeno: formaciones Jagua (Jurásico Superior (Oxfordiano Medio) – Jurásico Superior (Oxfordiano Superior)), Guasasa (Jurásico Superior (Oxfordiano) – Cretácico Inferior (Valanginiano)), Pons (Cretácico Inferior (Aptiano) – Cretácico Superior (Turoniano)) y Ancón (Paleoceno Superior – Eoceno Inferior (parte baja)) y terrígeno de carácter olistostromico: Formación Manacas (Paleoceno Superior – Eoceno Inferior), distribuidos en forma de bandas alargadas de rumbo noreste-suroeste.

Figure 2. Geologic map 1:25000 (modified of García *et al.*, 2011, starting from the interpretation of satellite and aerial images, and field observations). Three different lithological types are shown: clastic: San Cayetano formation (Lower Jurassic - Upper Jurassic (Middle Oxfordian)); calcareous and calcareous – clastic: Jagua (Upper Jurassic (Middle Oxfordian) - Upper Jurassic (Upper Oxfordian)), Guasasa ((Upper Jurassic (Oxfordian) - Lower Cretaceous (Valanginian)), Pons (Lower Cretaceous (Aptian) - Upper Cretaceous (Turonian)) and Ancón (Upper Paleocene - Lower Eocene (lower part)) formations and clastic (olistostromic): Manacas formation (Upper Paleocene - Lower Eocene), forming bands of direction northeast-southwest.

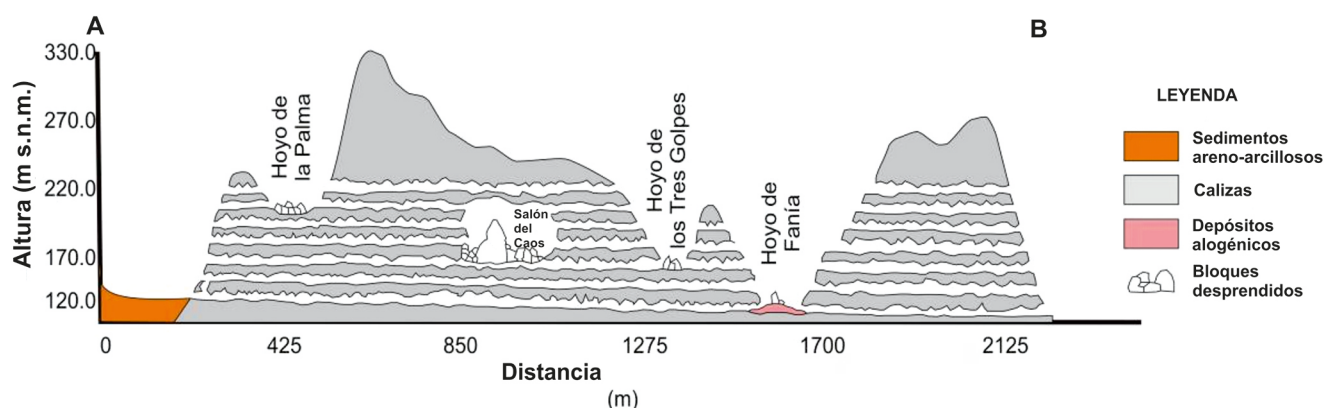


Figura 3. Corte transversal a través de la Sierra del Quemado, por la línea A - B, donde se observa la relación entre alturas de bocas de cuevas y fondo de dolinas colapsadas.

Figure 3. Profile through Sierra del Quemado, A – B section, where a relationship between caves heights and collapsed doline bottoms is observed.

Peñas al oeste y las Alturas de Pizarras al norte y al sur. En ella predominan rocas carbonatadas, además de rocas siliciclásticas y carbonatado-siliciclásticas de edades entre el Jurásico inferior hasta el Eoceno inferior. Como características generales, los depósitos siliciclásticos sobrecorrieron a los de origen carbonatado; formando secuencias con carácter alóctono, las que fueron emplazadas tectónicamente desde el sureste, durante la Orogenia Cubana.

Con el cese de los cabalgamientos cambia la historia tectónica de la región, prevaleciendo los movimientos verticales, con una tendencia general al ascenso, evidenciado por los varios niveles de cavernamiento y fondos de dolinas de disolución y desplome existentes. Las calizas masivas y estratificadas están dispuestas en cadenas de montañas petromórficas en las que la disolución de las rocas ha favorecido el desarrollo de procesos kársticos epigenéticos desde finales del Oligoceno – principios del Mioceno, debido a los factores lito-estratigráficos siguientes: presencia de calizas masivas o estratificadas y grado de agrietamiento; factores tectónicos: movimientos horizontales (cabalgamientos) y verticales (neotectónicos); factores climáticos (altas temperaturas y alta tasa de humedad) y cambios del nivel de base local de erosión a partir de las oscilaciones del nivel del mar (Molerio *et al.*, 1999; Florea *et al.*, 2007; Díaz, 2017).

2. Metodología

De acuerdo con el modelo conceptual aplicado a esta investigación, según los criterios de

Lehmann (1960 a and b), Molerio *et al.* (1999), Farfán, *et al.* (2010 a and b) y Díaz (2017), en la dirección vertical las dolinas de disolución y desplome se desarrollan hasta la superficie de erosión de base más próxima y su profundización está controlada por pérdidas de estabilidad, debido a la presencia de una cavidad más joven bajo ella (Figura 3). Además, las alturas de las bocas emisivas de las cavidades subterráneas marcan superficies regionales de erosión del karst según Molerio *et al.* (1999), Farfán *et al.* (2010 a and b), Díaz (2017).

El análisis de la relación entre las alturas de bocas de cavidades subterráneas y fondos de dolinas se realizó mediante un gráfico estadístico de tipo QQ general, elegido para evaluar la similitud de las distribuciones de dos series de datos de diferentes dimensiones. Para la aplicación de este método los datos se ordenan de forma creciente y se les asigna el valor del rango i correspondiente, calculando el valor u de acuerdo a la expresión $(i-0.5)/n$, propuesta por Hazen (1930). Con este parámetro se estiman los valores de una distribución de frecuencias inversa, comparando los valores observados para determinar si la muestra posee una distribución teórica específica. Este procedimiento puede emplearse para determinar si dos variables poseen un mismo tipo de distribución estadística.

También se realizó el análisis de cotas del relieve contra su área de distribución. Este gráfico permite conocer el área que ocupa cada altura de superficie, definiendo más claramente saltos o escalones morfoestructurales, que pudieran asociarse a niveles de base o superficies de erosión.

Las rupturas observadas en las curvas de ambos gráficos permiten la detección de escalones morfológicos, correspondientes a superficies de erosión del karst para la región, comparándolos con los niveles cavernarios trazados para la cuenca del río Cuyaguaje, a partir de alturas de bocas de cuevas emisoras (Molerio *et al.*, 1999).

3. Resultados y discusión

El inicio de los procesos erosivos en la cordillera de Guaniguanico puede fijarse en la parte alta del Ypresiense (aproximadamente 50 Ma), al ser el momento cuando emerge el territorio y el comienzo de la destrucción de la cobertura de mantos en los sectores más elevados y la acumulación de las secuencias post-orogénicas en las zonas más bajas, según Pszczółkowski *et al.* (1987) e Iturralde *et al.* (2011).

Evidencias de los supuestos anteriores son:

1. Presencia de clastos gruesos (hasta 0.7 m de diámetro, karstificados) en secuencias eocénicas depositadas en una cuenca sedimentaria localizada, al sur del área de estudio, compuestos en gran medida de calizas de edad Oxfordiense superior-Vallanginiense, provenientes de la erosión de la cordillera de Guaniguanico, subzona Sierra del Rosario, ya entonces formada, (Piotrowski, en Pszczółkowski *et al.*, 1987; Brust *et al.*, 2011; Villegas *et al.*, 2014).
2. La relación espacial de las secuencias carbonatadas de las formaciones Artemisa y Guasasa, así como la relativa poca potencia actual de los mantos de secuencias siliciclásticas que las cubren, con espesores de entre 40 m y 60 m (Astajov *et al.*, 1981; Burov *et al.*, 1988).
3. No se han encontrado secuencias de origen marino más antiguas que el Eoceno inferior en la Sierra de los Órganos, y sí existen, en zonas aledañas, rocas miocénicas que descansan directamente sobre secuencias jurásico-cretácicas de esta Sierra, según los datos de los pozos: Número 18 (Astajov *et al.*, 1981), Guanahacabibes 1 (Segura *et al.*, 1985) y Guane 2 (Pucharovsky *et al.*, 1985).
4. La presencia de superficies de erosión kársticas en la cima de los mogotes, que encierran materiales carbonatados o carbonatado-terrágenos litificados de una edad Plioceno, como es el caso de la corteza de intemperismo del yacimiento de fosforita “La Pimienta”, constituida por redepósitos de edad Plioceno-Cuaternario y las manifestaciones de bauxitas del tipo carbonatadas redepositadas (Astajov *et al.*, 1981).
5. La existencia de karstificación *exsitu*, manifestada en forma de bloques desprendidos y rotados, como la que aparece en varias dolinas de las sierras del Quemado, Guasasa, San Vicente, Galeras, en la Puerta de Ancón (Díaz, 2017).
6. La existencia de una etapa morfogenética anterior a la actual, como se puede apreciar por los puntos de ruptura en el gráfico QQ y la curva hipsométrica, donde existen superficies de erosión del karst mucho más altas que las fechadas para la cuenca del Río Cuyaguaje (Molerio *et al.*, 1999) y, por tanto, más antiguas (Díaz, 2017) (Figura 4, Tabla 1).

Estas evidencias, junto a la interpretación de procesos geoambientales y criterios paleoclimáticos (Piotrowski en Pszczółkowski, 1987; Pajón, 2007; Cobiella, 2008; Rojas and Alabarreta, 2009; Uriarte, 2009; Menéndez *et al.*, 2011; Rojas, 2010; Brust *et al.*, 2011; Iturralde *et al.*, 2011; Rojas and Denis, 2011; Villegas *et al.*, 2014) permiten afirmar que para el Eoceno superior Bartoniense (38 Ma), ya la Cordillera de Guaniguanico se encontraba emergida y sometida a los procesos erosivos. Por tanto, la edad del comienzo del desarrollo del karst epigenético en la Sierra de los Órganos puede remontarse al final del Oligoceno – principios del Mioceno (unos 25 – 23 Ma aprox.), cuando son destapadas las primeras rocas carbonatadas de la cordillera (Díaz, 2017) (Tabla 1).

Mientras, de forma general, la región ascendía lentamente y oscilaba el nivel del mar, descendía el nivel de base regional de erosión dando lugar a superficies de nivelación disecadas por numerosas dolinas. En este momento, las corrientes superficiales desaparecen parcialmente para convertirse en corrientes subterráneas.

En este periodo, el clima era frío, y posiblemente húmedo, con abundantes precipitaciones. Se intensificaron los procesos kársticos y las regiones emergidas estaban sometidas a

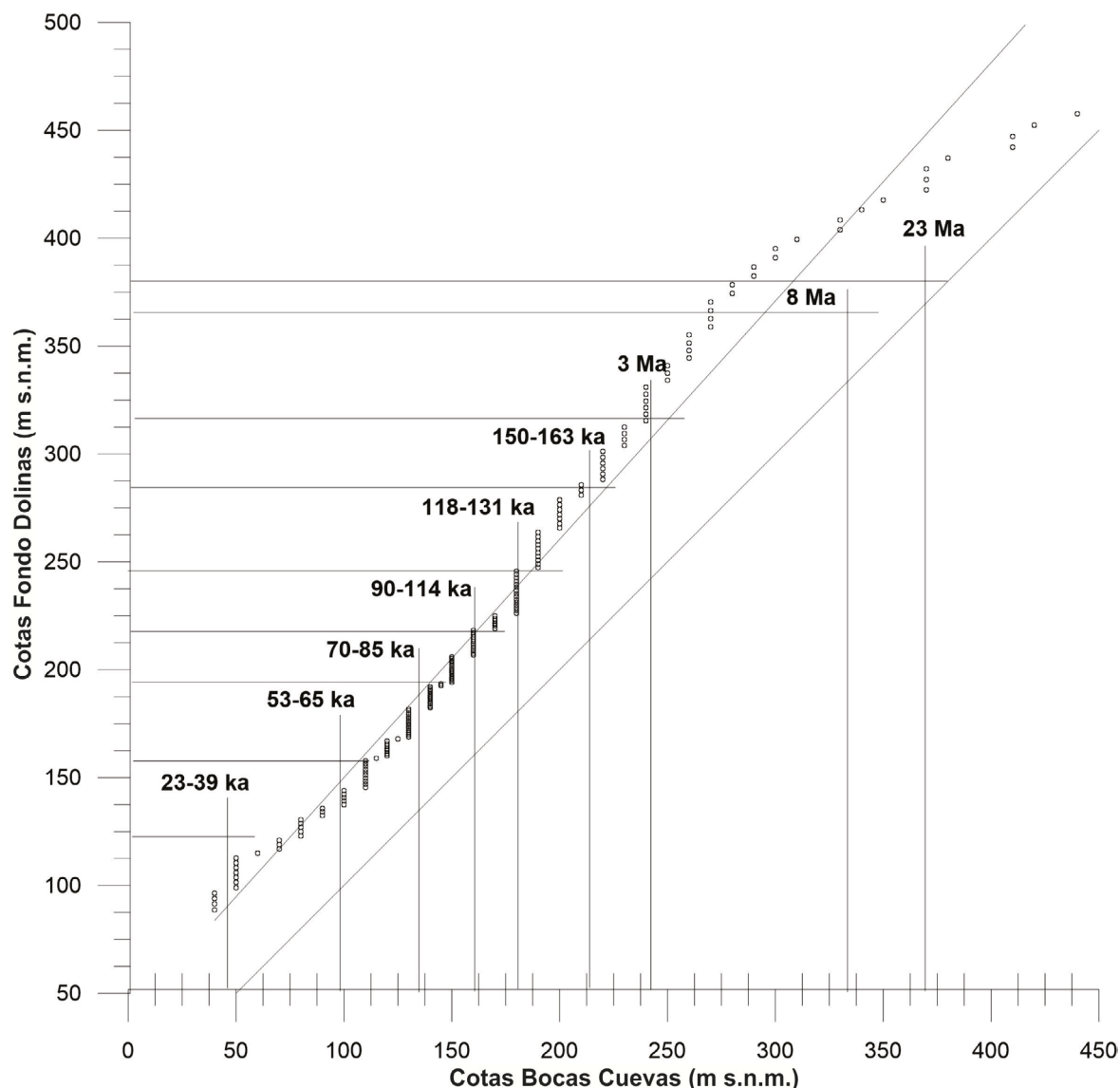


Figura 4. Gráfico Q-Q para alturas de bocas de cuevas y alturas de fondos de dolinas, con dataciones relativas a partir de datos geoambientales y criterios paleoclimáticos (Díaz, 2017) (ver Tabla 1). Los cruces de líneas muestran los intervalos cuando ocurren los saltos (superficies de erosión del karst): los seis primeros saltos coinciden con las edades de niveles de cavernamiento establecidos para la cuenca del río Cuyaguatzeje en el Cuaternario (Molerio *et al.*, 1999) y los tres últimos quedan fuera del límite de la datación, siendo considerados más antiguos. Las fechas están expresadas en miles de años antes del presente (Ka ap).

Figure 4. Q-Q graphic for cave heights and heights of doline bottoms, established from environmental and paleoclimatic data (Díaz, 2017) (see Table 1). Jumps (karst erosion levels) are indicated by intersections between horizontal and vertical lines: the first six jumps coincide with those dated for Cuyaguatzeje river basin during the Quaternary (Molerio *et al.*, 1999) and the last three are considered older than Quaternary.

una fuerte erosión. El territorio de la región era ocupado por una gran zona central amesetada, compuesta por las secuencias siliciclásticas que, hacia su parte media, estaba cortada perpendicularmente por una cadena de elevaciones de origen calcáreo. La Tabla 1 recoge la datación relativa de la evolución del karst epigenético en el área de estudio.

4. Conclusiones

1. El modelo evolutivo de la karstificación epigenética permitió definir nueve superficies o niveles de base de erosión para la Sierra de los Órganos, en un rango de +50 a +410 m.
2. En la región central de la Sierra de los Órganos existen al menos tres superficies de

Periodo	Serie	Piso	Edad	Procesos Geoambientales	Criterios Paleoclimáticos	Niveles de base de erosión del karst
CUATERNARIO	HOLOCENO		8 Ka	La superficie del nivel freático se elevó en todo el territorio, empantanamiento de las partes bajas del relieve (ambientes de humedales y lagunas en las llanuras).	Pico de pluviosidad. Rellenamiento general y re excavación en los cauces temporales. Amplia variabilidad climática, con una tendencia general al calentamiento para el área kárstica de montaña de la Sierra de los Órganos (Pajón, 2007).	50 m Nivel de base de erosión kárstica actual (surgencias de los ríos Cimarrones y Pan de Azúcar)
			11.5 Ka		Calentamiento climático abrupto (Pajón, 2007)	
	PLEISTOCENO		15 Ka	Edad de estalagmita Cueva Dos Anas (Pajón, 2007)	Bajos valores de temperatura (Pajón, 2007)	
			18 Ka	Último Máximo Glacial		
			39-23 Ka	La plataforma insular y una parte del talud insular cubano estaban expuestos a la intemperie. Se desarrolló y profundizó el relieve kárstico, y se formaron potentes cortezas de intemperismo. Disección profunda del relieve.		50-80 m (Grande, Chiquita, surgencia Arroyo el Jovero)
			65-53 Ka		Interglacial Sangamon. Clima cambiante. Se destacan etapas cálidas y húmedas, con transgresión marina. Lapsos de clima frío y seco (Pajón, 2007). Intenso desarrollo del karst, cavernas muy profundas con caídas verticales, cavernas aluviales con varios niveles superpuestos.	110-140 m (Primer Cauce, Cable I, Los Bloques)
			85-70 Ka			150-180 m (El Cable III, Mirador, Increíble)
			114-90 Ka			180-190 m (Alta, El Tambor, GEDA I y II)
			117 Ka			
			Superior	131-118 Ka	Ocurrencia de grandes eventos de precipitaciones (Pajón, 2007)	200-220 m (Meleno, Inclínada, Cumpleaños)
				163-150 Ka	Clima cambiante. Cálido y húmedo, con etapas frías y secas (Rojas, 2010; Iturralde et al., 2011).	240-260 m (El Panal, La Piedra, El Farallón, Cundingo, Paso a Ancón)
			Ioniense	780 Ka		
			Calabriense	1.8 Ma		
			Gelasense	2.6 Ma	Máxima elevación (bajo nivel del mar y máximo ascenso del terreno). (Iturralde et al., 2011)	270-280 m (El Totí, La Huella, Los Pichones)
	NEÓGENO	PLIOCENO	Piacenziense	3 Ma	Fuente modelado del relieve, depósitos continentales arcillosos – clásticos.	
			Zancienense	5.3 Ma	Episodio transgresivo.	

Periodo	Serie	Piso	Edad	Procesos Geoambientales	Criterios Paleoclimáticos	Niveles de base de erosión del karst	
NEÓGENO	MIOCENO	Messiniense	8 Ma	Gran regresión. Levantamientos de terreno en América Central, en las crestas, bajos e islas del Caribe. (Rojas <i>and</i> Alabarreta, 2009; Iturralde <i>et al.</i> , 2011).	Presencia de procesos y ambientes de karstificación desarrollados. Clima hacia el enfriamiento. Abundantes precipitaciones. Karstificación intensa. (Rojas, 2010; Iturralde <i>et al.</i> , 2011).	370-380 m (Nueve Cujes, La Ceniza, Abreu)	
		Tortonense	11.6 Ma	Amplia transgresión. Acumulaciones de depósitos marinos calcáreos, en ciclo transgresivo. (Rojas, 2010)	Máximo relativo de calentamiento (Iturralde, 2005; Iturralde <i>et al.</i> , 2011). Clima cálido y húmedo. Paleoprecipitaciones. Erosión química y biológica.		
		Serravallense	13.8 Ma				
		Langhiense	15 Ma				
		Burdigaliense	20 Ma				
	Aquitaniense	23 Ma	Acumulaciones de depósitos marinos mezclados, transgresivo - regresivos. Gran regresión. (Iturralde <i>et al.</i> , 2011)	Clima frío, y posiblemente húmedo. Paleoprecipitaciones. Intensificación de los procesos kársticos. Fuerte erosión.	410-420 m (El Gran Susto, Vista Pinar)		
PALEÓGENO	OLIGOCENO	Chatiense				Relictos de accidentes kársticos en superficies entre los 450 y los 600 m	
			28 Ma	Transgresión.	Clima cálido y húmedo. Paleoprecipitaciones. Erosión química y biológica.		
		Rupeliense	34 Ma	Gran regresión. Formación de Garlandia. (Iturralde <i>et al.</i> , 2011)	Clima cálido con tendencia al enfriamiento (Iturralde <i>et al.</i> , 2011). Precipitaciones abundantes. Posible inicio del desarrollo del karst epigenético en la Cordillera de Guaniguanico.		
	EOCENO	Priabonense	37.8 Ma	Destapadas las rocas carbonatadas de la Cordillera de Guaniguanico. (Pszczółkowski <i>et al.</i> , 1987; Brust <i>et al.</i> , 2011; Villegas <i>et al.</i> , 2014)			
		Bartoniense	38 Ma				
			41.2 Ma				
		Luteciense	47.8 Ma	Acumulaciones de potentes turbiditas con litoclastos de carbonatos jurásicos, provenientes de la Cordillera. (Pszczółkowski <i>et al.</i> , 1987; Cobiella, 2008; Iturrlade <i>et al.</i> , 2011)	Clima cálido y muy húmedo del Eoceno. Intensas precipitaciones (Uriarte, 2009, Menéndez <i>et al.</i> , 2010).	Inicio de los procesos erosivos en la cordillera de Guaniguanico	
		Ypresiense	50 Ma	Levantamiento parcial de crestas e islas en la parte norte de Centroamérica y el Caribe. (Iturralde <i>et al.</i> , 2011)	Máximo térmico del Paleoceno tardío. Caída de la temperatura a nivel global (Uriarte, 2009)		
			56 Ma				
	PALEOCENO	Thanetiense	59 Ma		Clima de alta humedad, propio de un ambiente cálido, tropical a subtropical, con influencia de precipitaciones fuertes. (Rojas <i>and</i> Denis, 2011)		
		Selandiense	61.6 Ma				
		Daniense	66 Ma				

Tabla 1. Datación relativa de las superficies de erosión del karst epigenético para la región central de la Sierra de los Órganos (Díaz, 2017).

Table 1. Relative dating of the epigenetic karst erosion levels for Sierra de los Órganos central region (Díaz, 2017).

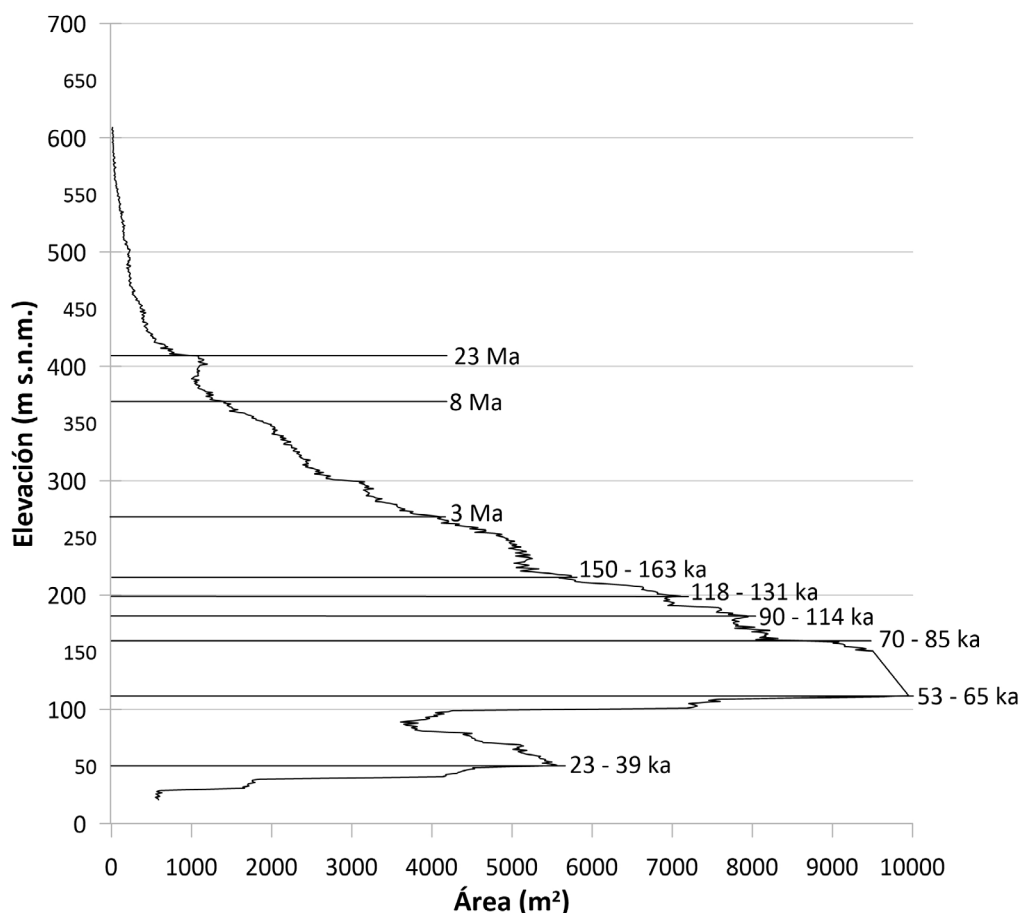


Figura 5. Relación de alturas del relieve contra área de distribución (en m²). Las líneas continuas señalan puntos de ruptura que coinciden con los puntos de ruptura observados en el gráfico Q-Q. En la parte superior aparece la edad obtenida sobre la base de datos paleoambientales y criterios paleoclimáticos (Díaz, 2017; ver Tabla 1).

Figure 5. Relationship of heights - distribution area (m²). Continuous vertical lines indicate rupture points that coincide with the rupture points observed in the Q-Q graphic. Dates above the vertical lines are established from environmental and paleoclimatic data (Díaz, 2017; see table 1).

erosión del karst por encima de los calculados para la cuenca del río Cuyaguaje, por lo que son niveles más antiguos, pertenecientes a ciclos erosivos anteriores:

- La superficie de erosión del karst más antiguo conservado para la región central de la Sierra de los Órganos está situado entre las cotas +410 – 420 m s.n.m. y se desarrolló entre finales del Oligoceno y principios del Mioceno, unos 23 Ma antes del presente;
- La segunda superficie de erosión del karst se desarrolló entre el Mioceno tardío Messiniense y el Plioceno temprano Zancienense, unos 8 Ma atrás, entre las cotas +370 – 380 m s.n.m.;
- Entre el Plioceno superior Piacenziano y el Pleistoceno inferior Gelasiense, 3 Ma atrás, se desarrolló la tercera superficie

de erosión del karst entre las cotas +270 – 280 m s.n.m.;

3. Como características generales, las formas del karst epigenético en la región central de la Sierra de los Órganos presentan un fuerte control litológico, estratigráfico y tectónico y, aunque surgieron en momentos diferentes, todas coexisten en el paisaje de hoy.

Referencias

- Astajov, K., Solianik, V., Vasiliev, V., Martínez, D., Fernández, R., Orbiña, R., Dimidov, J., and Santa María, S. (1981). Informe sobre los trabajos de levantamiento Geológico escala 1:5000 en 1a parte noroeste de 1a provincia de Pinar del Río (hoja 3484-III, 3483-III y 3483-IIIa). Informe inédito. Empresa de Geología de Pinar del Río, Oficina Nacio-

- nal de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas.
- Brust, J., Hüneke, H., Meschede, M., and Sommer, M. (2011). Facies and provenance of basin margin deposits in the Los Palacios Basin (Capdevila Formation, Cuba). *Facies*, 57, 73–92. DOI: 10.1007/s10347-0100233-1.
- Burov, V., Martínez, D., Jusainov, Y., and Fernández de Lara, R. (1988). Informe sobre los trabajos de levantamiento Geológico a escala 1:50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río, entre los años 1981-86. Informe inédito. Archivo Oficina Nacional de Recursos Minerales. Ministerio de Energía y Minas. República de Cuba. No. Archivo: 3563.
- Casagrande, G., Cucchi, F., and Zini, L. (2005). Hazard connected to railway tunnel construction in karstic area: applied geomorphological and hydrogeological surveys, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 243–250, <https://doi.org/10.5194/nhess-5-243-2005>, 2005
- Cobiella-Reguera, Jorge L. (2008). Reconstrucción palinspástica 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.
- Day, M. J. (2007). Natural and anthropogenic hazards in the karst of Jamaica. In: M. Parise, and J. Gunn (eds.), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas. Recognition, Analysis and Mitigation*, Geological Society, London, Special Publications, 279, pp 173-184. DOI: 10.1144/SP279.14. 0305-8719/07.
- Díaz, C., Morales, G., Ramírez, R., and Farfán, H. (2011). Estructura geológica y su vinculación con las morfoestructuras del área de la cuenca del arroyo Santo Tomás y la sierra de Santo Tomás – Quemado. *Memorias IV Convención de Ciencias de la Tierra (Geociencias'2011)*. Sociedad Cubana de Geología. La Habana. Cuba. Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, La Habana, CD-Rom
- Díaz, C. (2017). El desarrollo del karst epigenético en el modelo evolutivo de la Sierra de los Órganos. Caso de estudio región central de la Sierra de los Órganos. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad de Pinar del Río. Cuba. <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/2805>
- Farfán, H., Díaz, C., and Aldana, C. (2010a). Dolines in Sierra de Quemados and their relationship with the development of the Gran Caverna de Santo Tomás, Viñales, Cuba. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-1539, 2010. EGU General Assembly 2010
- Farfán, H., Díaz, C., and Ramírez, R. (2010b). Algunas consideraciones sobre el desarrollo y distribución de las dolinas en el Parque Nacional Viñales, Pinar del Río, Cuba. *Mapping interactivo. Revista internacional de Ciencias de la Tierra*. Vol: Febrero-Marzo/2010. http://vww.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1552 (1 of 7)2/10/2010.
- Florea, L. J., Vacher, H. L., Donahue, B., Naar, D. (2007). Quaternary cave levels in peninsular Florida. *Quaternary Science Reviews*, 26, 1344-1361. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.02.011
- Flores, E., and Flores, L. (1998). Evolución y desarrollo tridimensional de la Cueva de los Gigantes, Sistema Cavernario Majagua-Canteras. *Memorias III Congreso de Geología y Minería*. Tomo I. PP 244-247. Editorial C.N.D.I.G. La Habana.
- Ford, D. C., and Williams, P. W. (1989). *Karst geomorphology and hidrology*. Unwin Hyman. London, 601 pp.
- García, D. E., Gil, 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., and 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.
- Gradziński, R., and Radomski, A. (1963). Types of Cuban caves and they dependence controlling karst development. *Bulletin Academia Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Geologique et Geographique*, 40(3), 151-210.
- Gradziński, R., and Radomski, A. (1965). Origen and development of internal poljes “hoyos” in the Sierra de Los Órganos. *Bulletin Academia Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Geologique et Geographique*, 13(2), 181-186.
- Gradziński, R., and Radomski, A. (1967). Spenstresenia nad reswojeu jaskiki krasu kopiastege West Sierra de Los Órganos (Kuba). *Acta Geologica Polonica*, 17(2), 273-297.
- Gutiérrez, R. (1995). Condiciones geológicas del desarrollo diferenciado de la karsificación en la Cordillera de Guaniguanico. Cuba Occidental. In: A. Pulido-Bosh, J. R. Fagundo, J. E. Rodríguez (eds.), *El Karst y los Acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio*. Universidad de Granada, España, ISBN: 84-605-1917-1, pp. 11-26.
- Hazen, A. (1930). *Flood Flows: A Study of Frequencies and Magnitudes*, John Wiley & Sons, New York.
- Hernández, I., Pajón, J., and Cabrera, H. (2001). Paleoclima Multimedia. In: J. M. Pajón (ed.), *Reconstrucción paleoclimática y paleoambiental del Pleistoceno Tardío-Holoceno para Cuba Occidental*. Informe inédito. Monografía (273 pp.). Banco de Proyectos del Programa Nacional de Cambios Globales y la Evolución del Medio Ambiente Cubano (GEPROP), Ciudad de La Habana: pp. 6-16
- Iturralde, M., Ceballos, Y., García, A., Pszczółkowski, A., Fagundo, R., Batista, R., and Gasparini, Z.

- (2011). Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. DVD-ROM. Editorial CITMATEL, ISBN 9-789592-572863 La Habana, Cuba.
- Lehmann, H. (1960a). Las áreas cársicas del Caribe. *Revista Sociedad Geográfica de Cuba*, año XXX, num. 2, 45-53.
- Lehmann, H. (1960b). International Karst Atlas. Blatt 1, "Sierra de Los Órganos", *Ztschr. F. Geomorphologie*. Suppl 2.
- Lolcama, J. L., Cohen, H. A., and Tonkin, M. J. (2002). Deep karst conduits, flooding, and sinkholes: lessons for the aggregates industry. *Engineering Geology*, 65, 151–157.
- Magaz, G. A., and Cisneros, L. R. (1995). Criterios morfoestructurales para la caracterización de sistemas kásticos y sus acuíferos en el ejemplo de la depresión intramontana San Claudio-San Francisco, Sierra del Rosario, Cuba. In: A. Pulido-Bosh, J. R. Fagundo, and J. E. Rodríguez, (eds.), *El Karst y los Acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio*. Universidad de Granada, España, ISBN: 84-605-1917-1, pp. 47-62.
- Marinos, P. G. (2001). Tunnelling and mining in karstic terrain: an engineering challenge. In: B. F. Beck, and J. G. Herring (eds.), *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*. Swets & Zeitlinger, Lisse, 3-16.
- Menéndez, L., Rojas, R., Villegas, J., and López, R. A. (2011). Taphonomy, chronostratigraphy and paleoceanographic implications at turbidite of Early Paleocene (Vertientes Formation), Cuba. *Revista Geológica de América Central*, 45, 87-94.
- Molerio, L. (1984). La estructura geológica y el campo de propiedades físicas de los acuíferos cársicos. Resumen. X Jornada Científica del Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, p. 88.
- Molerio, L., Guerra, M., Rocamora, E., and Pajón, J. (1999). Caracterización de los niveles de cavernamiento del karst de Cuba Occidental y su relación con las oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario. En: Monografía "Proyecto Paleoclima del Cuaternario Cubano: una caracterización cuantitativa. Informe inédito. Banco de Proyectos del Programa Nacional de Cambios Globales y la Evolución del Medio Ambiente Cubano, 142, 113-170.
- Molerio, L., Balado, E., Astraín, P. J., Aldana, C., Fernández, R., Gutiérrez, R., Jáimez, E., Fagundo, J. R., González, J. B., Lavandero, R., Martínez, J., Mahe, M., De Armas, L. F., Clinche, J. L., Pajón, J., Dalmau, E., Crespo, T., Graña, A., Vento, E., Guerra, M. G., Romero A., Martínez, M. C., and Martínez A. (2004). *El Mundo Subterráneo*. Universidad para Todos, Suplemento especial, Edición: N. Rodríguez, Editorial Academia, 32 pp. <http://www.medioambiente.cu/>
- Núñez, A., Viña, N., Graña, A., Mateo, J., and Iturralde M. (1988). *Cuevas y carsos*. Ed. Científico-Técnica. La Habana. 431 pp.
- Pajón, J. M. (2007). Cambios Climáticos Abruptos en la Transición Pleistoceno-Holoceno a partir de Paleoregistros Isotópicos. Casos de estudio con espeleotemas. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2007. Memorias en CD-Rom, La Habana, 20-23 de marzo de 2007. ISBN 978-959-7117-16-2.
- Panos, V., and Stelcl, O. (1968a). Physiographie and geologic control in development of Cuban Mogotes. *Sonderbruck aus; Zeitschrift fur Geomorphologie*. Neue Folge, Band 12, 109-117.
- Panos, V., and Stelcl, O. (1968b). Problems of the conical karst in Cuba. *Proc. 4th International. Congress Speleologie*. III, 533-555, Ljubljana.
- Penk, W. (1924). *Die geomorphologische Analyse*. Stuttgart: Verlag von J. Engelhorn's Nachf.
- Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R., and Jeutter, P. (2009). Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology—A case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). *Geomorphology*, 106, 118–129.
- Pszczółkowski, A., Piotrowska, K., Piotrowski, J., de La Torre, A., Miczynski, R., and Haczewski, G. (1987). Contribución a la Geología de Pinar del Río. Editorial Científico Técnica. Ministerio de Cultura. La Habana. 225 pp.
- Pucharovsky, Y., Borkowska, M., Hamor, G., Suarez, J., and Velinov, I. (eds.) (1985). *Mapa Geológico de Cuba a Escala 1: 250 000*. Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geología y Paleontología. Editor: Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de la URSS.
- Rocamora, E. (1998). La fotointerpretación digital en regiones cársicas: Caso de estudio Sierra del Quemado, Cuba. *Memorias III Congreso de Geología y Minería*. Tomo I. PP. 614 617. Editorial C.N.D.I.G. La Habana.
- Rojas, R., and Alabarreta N. (2009). Sinopsis del registro fósil de Cuba. Sitio web sobre Paleontología de Cuba. In: <http://www.redciencia.cu/webpaleo>.
- Rojas, R. (2010). Síntesis del registro fósil de Cuba. Programa y resúmenes, II Simposio de Museos y Salas de Historia Natural, Museo Nacional de Historia Natural (CITMA), 23 al 26 de mayo del 2008. La Habana, Cuba (CD ROM). ISBN 978-959-282-072-6.
- Rojas, R., and Denis, R. (2011). Influencia climática en los sistemas turbidíticos del Paleógeno cubano. Resumen y Trabajo. VI Congreso Cubano de Geología, Geología Regional y Tectónica, GEO1-P4, 20 pp. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIA' 2011. Memorias en CD-ROM, La Habana, 4 al 8 de abril de 2011. ISBN 978-959-7117-30-8.

- Rosa, C. R., Díaz, C., and Cáceres, D. (2004). La estructura fisural y el desarrollo del karst de la Sierra de Viñales, Cuba. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan". Federación italiana de Espeleología, Italia*, 49, 147-163.
- Segura, R., Millán, E., and Fernández, J. (1985). Complejos litológicos del extremo noroccidental de Cuba y sus implicaciones estratigráficas de acuerdo con los datos de las perforaciones profundas. *Revista Tecnológica*, 15, CDU 552.08 (729.11 + 729.12), 32-36.
- Uriarte, A. (2009). *Historia del clima en la Tierra*. Eusko Jaurlaritza, Gobierno Vasco. 403 pp.
- Villegas, J., Guimarães, R., Correa, E. L., and Rojas, R. (2014). Ichnofabrics of the Capdevila Formation (early Eocene) in the Los Palacios Basin (western Cuba): Paleoenvironmental and paleoecological implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 214-227.
- Waltham, A. C., and Fookes, P. G. (2005). Engineering classification of karst ground conditions. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. The Virtual Scientific Journal*. ISSN 1814-294X. www.speleogenesis.info
- Waltham, T., and Lu, Z. (2007). Natural and anthropogenic rock collapse over open caves. In: M. Parise, and J. Gunn, (eds.), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas. Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society, London, Special Publications, 279, 13-21. DOI: 10.1144/SP279.3. 0305-8719/07.
- White, W. A. (1988). *The Geomorphology and Hydrology of karst Terrains*. Oxford University Press, Oxford.
- Xeidakis, G. S., Torok, A., Skias, S., and Kleb, B. (2004). Engineering Geological problems associated with karst terrains: their investigation monitoring, and mitigation and design of engineering structures on karst terrains. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36, 1932-1941.

